

BAB IV

VALIDASI PEMBAHASAN

4.1 Umum

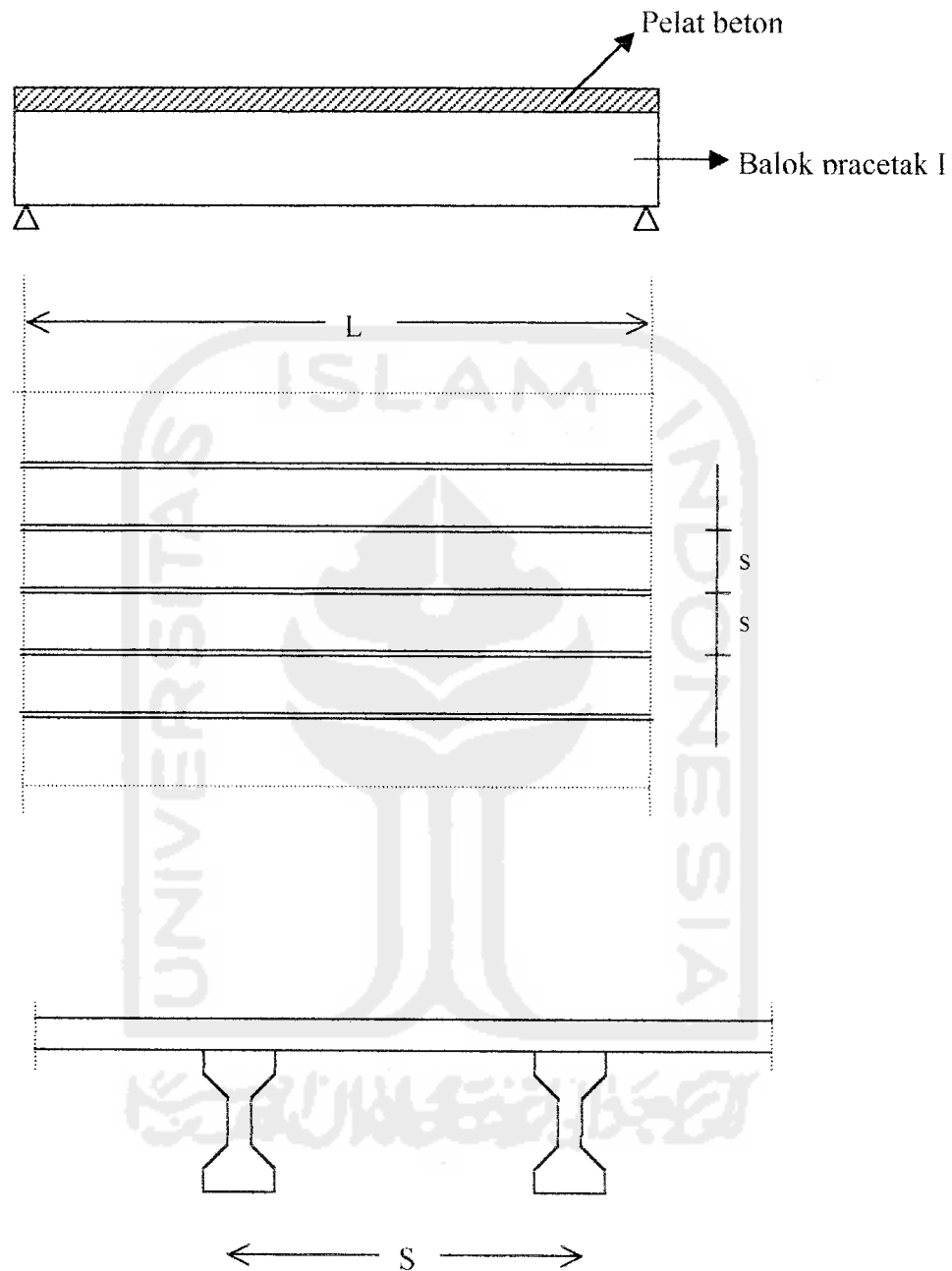
Untuk mengetahui apakah di dalam aplikasi yang dibuat masih terdapat kesalahan yang dapat menghasilkan hasil program menjadi tidak benar dan tidak sesuai dengan yang diinginkan maka dilakukan validasi program. Dengan melakukan validasi program maka kesalahan program dapat terdeteksi dan dapat dilakukan perbaikan program hingga dihasilkan program yang benar dan valid.

Metode yang digunakan dalam melakukan validasi program adalah dengan membandingkan hasil output program dengan hasil perhitungan manual. Dengan cara tersebut dapat dideteksi persentasi kesalahan relatif program yang mungkin terjadi.

4.2 Perhitungan Secara Manual

Pada perhitungan manual dibuat contoh perhitungan sebagai bahan untuk melakukan validasi. Berikut ini merupakan contoh perhitungan manual balok pracetak pratekan komposit.

4.2.1 Contoh Analisis Secara Manual Dengan Sistem penarikan Pratarik



Balok I standar AASHTO tipe IV sebagai balok sisi luar di atas dua perletakan sederhana (sendi-rol), sebagai balok sisi tengah yang mempunyai data sebagai berikut :

- bentang (L) = 24 m,
- tebal pelat beton (t_s) = 200 mm,
- jarak antar balok (S) seragam sebesar 2500 mm.

Sifat-sifat mekanis balok pracecak, pelat beton dan baja :

Balok pracetak

- mutu beton balok pracetak ($f'c_{blk}$) = 45 N/mm²
- saat transfer beton baru mencapai 95 % $f'c_{blk}$
 $f'ci = 0,95 \cdot f'c_{blk} = 0,95 \cdot 45 = 42,75$ N/mm²
- teg. ijin beton serat tekan saat transfer (fci) = $-0,6 \cdot f'ci$
 $= -25,65$ N/mm²
- teg. ijin beton serat tarik saat transfer (fti) = $0,25 \cdot \sqrt{f'ci}$
 $= 1,635$ N/mm²
- teg. ijin beton serat tekan saat layan (fcs) = $-0,45 \cdot f'c_{blk}$
 $= -20,25$ N/mm²
- teg. ijin beton serat tarik saat layan (fts) = $0,25 \cdot \sqrt{f'c_{blk}}$
 $= 1,677$ N/mm²
- kehilangan gaya pratekan (LOF) = 0,25
- rasio kehilangan gaya pratekan (R) = $1 - LOF$
 $= 0,75$
- berat jenis beton (b_j) = 23 KN/m³

Pelat Beton

- mutu pelat beton ($f'c_{plt}$) = 28 N/mm²

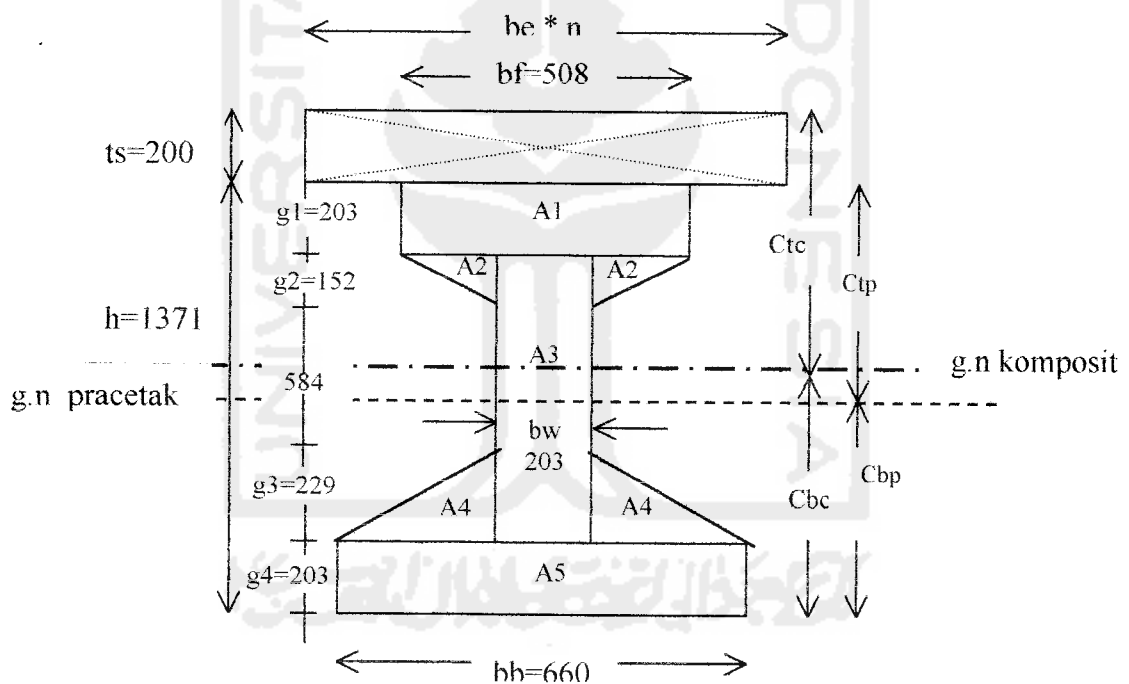
Baja Pratekan

- kuat tarik yang disyaratkan untuk tendon pratekan (f_{pu})
= 1800 N/mm²
- diameter kawat (D_r)
= 15,24 mm
- jumlah untaian kawat (*seven wire*)
= 7 kawat

Beban-beban bekerja yang diberikan

- beban mati (WD)
= 9 KN/m
- beban hidup (WL)
= 12 KN/m

Perhitungan Perencanaan Balok Pracetak



Tampang I standar AASHTO tipe IV :

- a. Tinggi balok (h) = 1371 mm
- b. Luas penampang (A_p) = $A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5$

$$A1 = 508 \cdot 203 = 103124 \text{ mm}^2$$

$$A2 = (1/2) \cdot (508-203) \cdot 152 = 23180 \text{ mm}^2$$

$$A3 = (1371-203-203) \cdot 203 = 195895 \text{ mm}^2$$

$$A4 = (1/2) \cdot (660-203) \cdot 229 = 52326,5 \text{ mm}^2$$

$$A5 = 660 \cdot 203 = 133980 \text{ mm}^2$$

$$A_p = 508505,5 \text{ mm}^2$$

c. Jarak dari cgc ke serat bawah (Cbp)

$$\begin{aligned} Cbp = & ((103124 \cdot (1371 - (203 / 2))) + (23180 \cdot (1371 - 203 - ((2/3)152))) \\ & + (195895 \cdot (((1371 - 203 - 203) / 2) + 203)) + (133980 (203/2))) \\ & / 508505,5 = 633,4976 \text{ mm} \end{aligned}$$

d. Jarak dari cgc ke serat atas (Ctp)

$$Ctp = h - Cbp = 1371 - 633,4976 = 737,5024 \text{ mm}$$

e. Momen Inersia Balok Pracetak (Ip)

$$\begin{aligned} I_p = & (((1 / 12) \cdot 508 \cdot 203^3) + (103124 \cdot (737,5024 - (203 / 2))^2)) + \\ & (((1 / 36) \cdot ((508 - 203) / 2) \cdot 152^3) \cdot 2) + (23180 \cdot (737,5024 - 203 - \\ & ((2 / 3) 152))^2)) + (((1 / 12) \cdot 203 \cdot ((1371 - 203 - 203)^3)) + \\ & (195895 \cdot (737,5024 - ((1371 - 203 - 203) / 2))^2) + (((1 / 36) \cdot \\ & ((660 - 203) / 2) \cdot 229^3) \cdot 2) + (52326,5 \cdot (633,4976 - 203 - \\ & ((2 / 3) \cdot 229))^2)) + (((1/12) \cdot 660 \cdot 203^3) + (133980 \cdot (633,4976 - \\ & (203/2))^2)) = 1.1695785120039 \text{ E+11 mm}^4 \end{aligned}$$

f. modulus tampang balok pracetak ke serat atas (Stp)

$$Stp = I_p / Ctp = 158586400,8 \text{ mm}^3$$

g. modulus tampang balok pracetak ke serat bawah (Sbp)

$$S_{bp} = I_p \cdot C_{bp} = 184622406,1 \text{ mm}^3$$

h. $rp^2 = I_p \cdot A_p$

$$= 230003,1193 \text{ mm}^2$$

i. jarak kern atas ke cgc balok pracetak (Kt)

$$K_t = rp^2 \cdot C_{bp} = 363,0686514 \text{ mm}$$

j. jarak kern bawah ke cgc balok pracetak (Kb)

$$K_b = rp^2 \cdot C_{tp} = 311,8676214 \text{ mm}$$

Menentukan eksentrisitas tendon

$$\text{Eksentrisitas max (emax)} = C_{bp} \cdot d_{min}$$

$$= 383,4976 \text{ mm}$$

Menentukan berat gelagar / balok pracetak

$$\text{Berat gelagar (WG)} = A_p \cdot w_{bt} \cdot 10^{-6}$$

$$= 11,6956265 \text{ KN}$$

Menentukan momen-momen yang terjadi sebelum balok menjadi komposit

$$MG = 1/8 \cdot WG \cdot L^2 = 842,085108 \text{ KNm}$$

$$MS = 1/8 \cdot WS \cdot L^2 = 828 \text{ KNm}$$

$$MD = 1/8 \cdot WD \cdot L^2 = 648 \text{ KNm}$$

$$ML = 1/8 \cdot WL \cdot L^2 = 864 \text{ KNm}$$

$$MT = MG + MS + MD + ML = 2354,085108 \text{ KNm}$$

Menentukan tegangan pada pusat (sentral)

$$|f_{cent}| = f_{ti} - \frac{C_{tp}}{h} (f_{ti} - f_{ci})$$

$$\begin{aligned}
 &= 1,635 - \frac{737,5024}{1371}(1,635 + 25,65) \\
 &= |-13,04261735| \\
 &= 13,04261735 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

Menentukan gaya pratekan awal

$$\begin{aligned}
 P_o &= A_p \cdot f_{cent} \\
 &= 508505,5 \cdot 13,04261735 \\
 &= 6632242,657 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Menghitung tegangan-tegangan yang terjadi sebelum balok komposit

Saat Transfer

- Tegangan serat atas

$$\begin{aligned}
 f_t &= -\frac{6632242,657}{508505,5} \left(1 - \frac{383,4976 \cdot 737,5024}{230003,1193} \right) - \frac{842,085108 \cdot 10^6}{158586400,8} \\
 &= -2,314307573 \leq f_{ci} = -25,65 \text{ N/mm}^2 \quad \text{AMAN}
 \end{aligned}$$

- Tegangan serat bawah

$$\begin{aligned}
 f_b &= -\frac{6632242,657}{508505,5} \left(1 + \frac{383,4976 \cdot 633,4976}{230003,1193} \right) + \frac{842,085108 \cdot 10^6}{184622406,1} \\
 &= -22,25798871 \leq -25,65 \text{ N/mm}^2 \quad \text{AMAN}
 \end{aligned}$$

Saat layan

- gaya pratekan = $R \cdot P_o$

$$= 0,75 \cdot 6632242,657 = 4974181,993 \text{ N}$$

- berat pelat (WS) = $S \cdot t_s \cdot w_{bt} \cdot 10^6 = 2500 \cdot 200 \cdot 23 \cdot 10^6 = 4974106,518 \text{ N}$

- momen akibat bban pelat (MS) = $1/8 \cdot 11,5 \cdot 24^2 = 828 \text{ KNm}$

- teg. serat atas

$$f_t = -\frac{4974181,933}{508505,5} \left(1 - \frac{383,4976.737,5024}{230003,1193}\right) - \frac{(842,085108 + 828).10^6}{158586400,8}$$

$$= -8,2843512 \leq f_{cs} = -20,25 \text{ N/mm}^2 \quad \text{AMAN}$$

- teg. serat bawah

$$f_b = -\frac{4974181,933}{508505,5} \left(1 + \frac{383,4976.633,4976}{230003,1193}\right) + \frac{(842,085108 + 828).10^6}{184622406,1}$$

$$= -11,06838165 \leq f_{cs} = -20,25 \text{ N/mm}^2 \quad \text{AMAN}$$

Menentukan lebar efektif pelat balok (sisi tengah)

$$b_e = b_f + (12 \cdot t_s) = 508 + (12 \cdot 200) = 2908 \text{ mm}$$

$$b_e = S = 2500 \text{ mm}$$

$$b_e = L/4 = (24 \cdot 10^3) / 4 = 24000 / 4 = 6000 \text{ mm}$$

dipilih b_e yang terkecil, yaitu $b_e = 2500 \text{ mm}$

karena mutu beton balok pracetak dengan pelat berbeda maka perlu adanya faktor modifikasi "n" untuk menentukan lebar sayap efektif (b_{tr})

$$n = \frac{4730\sqrt{f'c_{pl}}}{4730\sqrt{f'c_{blk}}}$$

$$n = \frac{4730\sqrt{28}}{4730\sqrt{45}} = 0,788810637$$

maka, $b_{tr} = n \cdot b_e$

$$= 1972,026593 \text{ mm}$$

Perhitungan perencanaan balok komposit

a. luas pelat (A_{pelat}) = $b_{tr} \cdot t_s = 1972,026593 \cdot 200 = 394405,3186 \text{ mm}^2$

b. luas balok komposit (A_c) = $A_p - A_{pelat} = 508505,5 + 394405,3186$

$$A_c = 902910,8186 \text{ mm}^2$$

c. jarak egc penampang komposit ke serat bawah (C_{bc})

$$\begin{aligned} C_{bc} &= \frac{(A_{pelat} \cdot (h \cdot (t_s / 2))) + (A_p \cdot C_{bp})}{A_c} \\ &= \frac{((394405,3186 \cdot (1371 + (200 / 2))) + (508505,5 \cdot 633,4976))}{902910,8186} = 999,3315164 \text{ mm} \end{aligned}$$

d. jarak egc penampang ke serat atas (C_{tc})

$$\begin{aligned} C_{tc} &= (h + t_s) - C_{bc} \\ &= (1371 + 200) - 999,3315164 = 571,6684836 \text{ mm} \end{aligned}$$

e. momen inersia penampang komposit (I_c)

$$\begin{aligned} I_c &= I_p + (A_p \cdot (C_{bc} - C_{bp})^2) + ((1/12) \cdot b \cdot t_s^3) + (A_{pelat} \cdot (C_{tc} - (t_s / 2))^2) \\ &= 1.1695785120039 \text{ E}+11 + (508505,5 \cdot (999,3315164 - 633,4976)^2) \\ &\quad + ((1/12) \cdot 1972,026593 \cdot 200^3) + (394405,3186 \cdot (571,6684836 \\ &\quad - (200 / 2))^2) = 274071883947,871 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

f. modulus tampang balok komposit ke serat atas (S_{tc})

$$\begin{aligned} S_{tc} &= I_c / C_{tc} \\ &= 479424532,623 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

g. modulus tampang balok komposit ke serat bawah (S_{bc})

$$S_{bc} = I_c / C_{bc} = 274255212,31 \text{ mm}^3$$

Menentukan tegangan-tegangan yang terjadi pada balok komposit

- teg. serat atas

$$f_t = -\frac{4974181,933}{508505,5} \left(1 - \frac{383,4976 \cdot 737,5024}{230003,1193}\right) - \frac{(842,085108 + 828) \cdot 10^6}{158586400,8} - \frac{(648 + 864) \cdot 10^6}{479424532,623}$$

$$= -11,43812684 \leq f_{cs} = -20,25 \text{ N/mm}^2$$

AMAN

- **teg. serat bawah**

$$fb = -\frac{4974181,933}{508505,5} \left(1 + \frac{383,4976.633,4976}{230003,1193}\right) + \frac{(842,085108 + 828).10^6}{184622406,1} + \frac{(648 + 864).10^6}{274255213,31}$$

$$= -5,555268702 \leq fcs = -20,25 \text{ N/mm}^2 \quad \text{AMAN}$$

Berarti tampang cukup ekonomis dan aman untuk digunakan sebagai komponen balok komposit.

Menentukan kekuatan lentur penampang komposit

- tinggi efektif penampang komposit (d_p) = $(1371 + 200) - d_{min}$
 $= 1321 \text{ mm}$

$$\beta_1 = 0,85 - 0,008(f'c_{blk} - 30) = 0,73$$

- kabel dengan relaksasi rendah, maka $\gamma_p = 0,4$

- luas tendon (A_{ps}) = $\frac{P_o}{0,7 \cdot f_{pu}} = 5263,684648 \text{ mm}^2$

diperkirakan seluruh beton tekan berada dipelat beton, maka :

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{b_e \cdot d_p} = 0,001593848493$$

$$f_{ps} = f_{pu} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_p \cdot \rho_p \cdot f_{pu}}{\beta_1 \cdot f'c_{blk}}\right) = 1733421553 \text{ N/mm}^2 > f_{py} = 1530 \text{ N/mm}^2$$

- dipilih nilai f_{py} sebagai f_{ps} , $f_{ps} = 1530 \text{ N/mm}^2$

- gaya-gaya dalam

$$T = A_{ps} \cdot f_{ps} = 8053437,511 \text{ N}$$

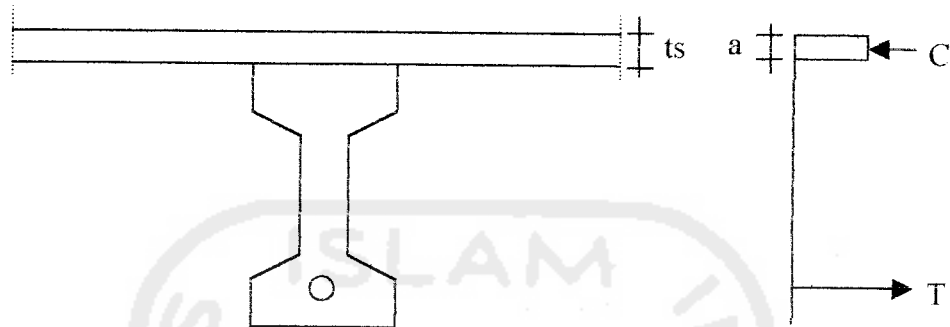
$$C = 0,85 \cdot f'c_{blk} \cdot b_e \cdot a$$

$$= 95625 \cdot a$$

keseimbangan gay-gaya dalam $C = T$, maka diperoleh:

$$95625 \cdot a = 8053437,511$$

$$a = 84,21895436 \text{ mm} < t_s = 200 \text{ mm} \quad \text{Anggapan Benar}$$



- kontrol rasio tulangan

$$\omega = \frac{\rho p \cdot f_{ps}}{f'_c \cdot b l k} = 5,420137587E-02 < 0,35 \cdot \beta_1 = 0,2555 \quad \text{Ok}$$

- kapasitas momen nominal yang diperlukan penampang komposit

$$M_n = T \left(d_p - \frac{a}{2} \right) \cdot 10^{-6} = 10299,46491 \text{ KNm}$$

Menentukan tata letak tendon

Perncaanmaan tata letak tendon dilakukan dengan peninjauan pada tumpuan (ujung balok), seperempat bentang, dan setengah bentang.

- momen pada tumpuan : $M = 0$
- momen pada $\frac{1}{4}$ bentang : $M = \left(\frac{3}{32} \right) \cdot W \cdot L^2$
- momen pada $\frac{1}{2}$ bentang : $M = \left(\frac{1}{8} \right) \cdot W \cdot L^2$

Selengkapnya momen-momen yang terjadi dapat dilihat pada tabel 4.1 berikut ini :

Tabel 4.1 momen-momen yang terjadi

Beban (KN/m)	Momen Pada (KNm)		
	Tumpuan	¼ Bentang	½ Bentang
Berat Gelagar (WG) = 11,6956265	0	631,563831	842,085108
Berat Pelat (WS) = 11,5	0	621	828
Beban Hidup (WL) = 12	0	648	864
Beban Mati (WD) = 9	0	486	648
Momen total (MT) =MG+MS+ML+MD	0	2386,563831	3182,085108

- **batas bawah letak tendon**

$$a_{\min} = \frac{MG \cdot 10^6}{P_o} \quad \text{dan} \quad eb = a_{\min} + Kb$$

Selengkapnya nilai batas bawah letak tendon dapat dilihat pada tabel 4.2 berikut ini :

Tabel 4.2 Batas bawah letak tendon

Tinjauan Pada	a_{\min} (mm)	e_b (mm)
Tumpuan	0	311,8676214
¼ Bentang	95,22628523	407,0939066
½ Bentang	126,9683803	438,8360017

- **batas atas letak tendon**

$$a_{\max} = \frac{MT \cdot 10^6}{P_e} \quad \text{dan} \quad et = a_{\max} + Kt$$

Selengkapnya nilai batas bawah letak tendon dapat dilihat pada tabel 4.3 berikut ini :

Tabel 4.3 Batas atas letak tendon

Tinjauan Pada	a_{\max} (mm)	e_t (mm)
Tumpuan	0	- 363,0686514
¼ Bentang	479,7902174	116,721566
½ Bentang	639,7202899	276,6516385

Jika diijinkan terjadi tegangan tarik maka terjadi pertambahan lebar daerah aman letak tendon sebesar :

$$eb' = \frac{f_{ti} \cdot A_c \cdot K_b}{P_o} = \frac{1,635.902910,8186.311,8676214}{6632242,657} = 69,41806347 \text{ mm}$$

$$et' = \frac{f_{ti} \cdot A_c \cdot K_t}{P_e} = \frac{1,677.902910,8186.363,0686514}{4974181,933} = 110,5210509 \text{ mm}$$

$$e_{b1} = eb + eb' \quad ; \quad e_{t1} = et - et'$$

Selengkapnya nilai pertambahan letak aman tendon dapat dilihat pada tabel 4.4 dan tabel 4.5 berikut ini :

Tabel 4.4 Batas bawah letak tendon jika teg. tarik diijinkan

Tinjauan Pada	eb1 (mm)
Tumpuan	381,2856849
¼ Bentang	476,5119701
½ Bentang	508,2540652

Tabel 4.5 Batas atas letak tendon jika teg. tarik diijinkan

Tinjauan Pada	et1 (mm)
Tumpuan	- 473,5897023
¼ Bentang	6,2005151
½ Bentang	166,1305871

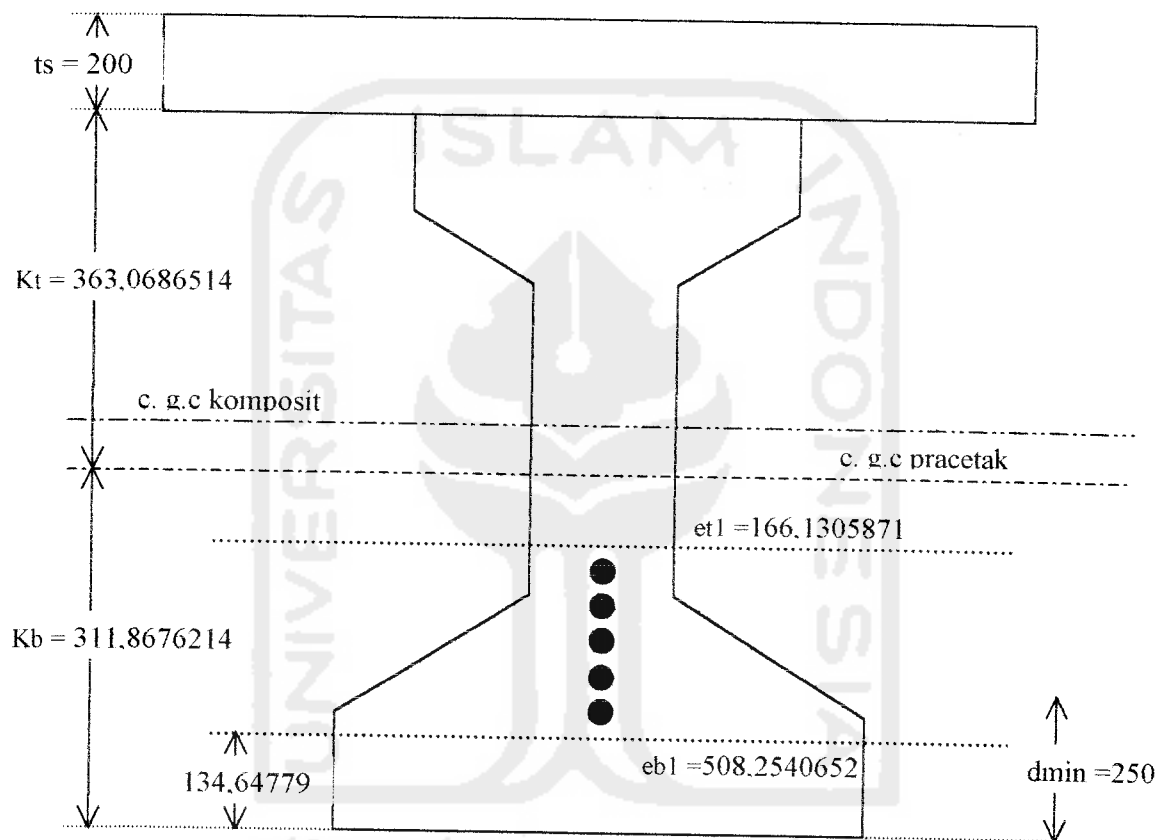
Menghitung jumlah strand

- diameter kawat (Dr) = 15,24 mm
- luas kawat (Ar) = $\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot Dr^2 = 182,4146925 \text{ mm}^2$
- jumlah untaian kawat (nr) = 7 kawat
- jumlah strand = (Aps / Ar * nr)

$$= 4,122227982 \sim 5 \text{ buah strand}$$

Penggambaran penampang balok pracetak pratekan komposit

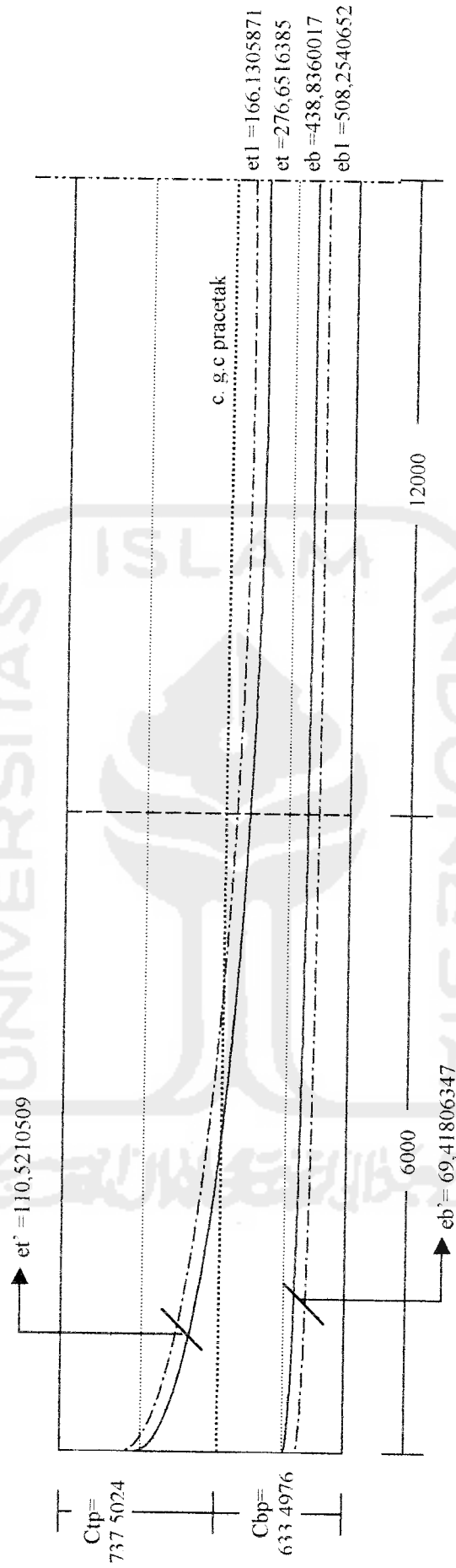
Berdasarkan hasil hitungan diatas maka gambar potongan penampang balok pracetak pratekan komposit I Standar AASHTO tipe IV pada tengah bentang dapat digambarkan sebagai berikut, seperti terlihat pada gambar 4.2 dibawah ini.



Gambar 4.1 potongan balok pracetak pratekan komposit I Standar AASHTO tipe IV pada tengah bentang

Penggambaran daerah batas letak aman tendon

Dari hasil perhitungan diatas, dapat digambarkan daerah aman letak batas tendon seperti terlihat pada gambar 4.2 berikut ini :



Gambar 4.2 Letak aman tendon / pemasangan strand balok pratekan pracetak I Standar AASHTO tipe IV pratarik komposit

4.2.2 Contoh Analisis Secara Manual Dengan Sistem penarikan Pascatarik

Balok komposit prategang pascatarik dengan tampang I bebas di atas 2 (dua) tumpuan sederhana (sendi – rol) mempunyai data sebagai berikut ini.

- a. Bentang balok (L) = 18 m
- b. Jarak antar girder (S) = 3 m
- c. Beban- beban yang bekerja :
 - i. Beban mati (WD) = 10 KN/m (tidak termasuk berat sendiri)
 - ii. Beban hidup (WL) = 16 KN/m
- d. Mutu bahan beton
 - i. f'_c balok = 45 Mpa dan f'_c pelat = 28 Mpa
 - ii. $f'_{ci} = 0,9 f'_c$ (pada saat transfer kekuatan beton baru mencapai 90 %)
 - iii. B_j beton (w_{bt}) = 23 KN/m
- e. Mutu bahan baja (baja relaksasi rendah) :
 - i. $f_{pu} = 1800$ Mpa
 - ii. $f_{py} = 85 \% f_{pu}$
 - iii. Loss of Prestress (LOF) = 18 %
- f. Luas baja prategang (A_{ps}) = 3000 mm²
- g. Diameter selubung tendon = 90 mm
- h. $d_{min} = 180$ mm (jarak pusat titik berat tendon ke serat terbawah)
- i. Pada saat transfer beban mati telah bekerja sebesar 15 %
- j. Posisi balok komposit pada bagian tengah
- k. Jumlah kawat yang digunakan dalam satu Strand (nr) = 7 untai (*seven wire*)

Dimensi balok pracetak :

- Tinggi balok (h) = 1100 mm
- Lebar sayap atas balok (bf) = 510 mm
- Lebar badan balok (bw) = 200 mm
- Lebar sayap bawah balok (bb) = 550 mm
- $g1$ = 230 mm
- $g2$ = 100 mm
- $g3$ = 110 mm
- $g4$ = 250 mm

Dimensi pelat cetak :

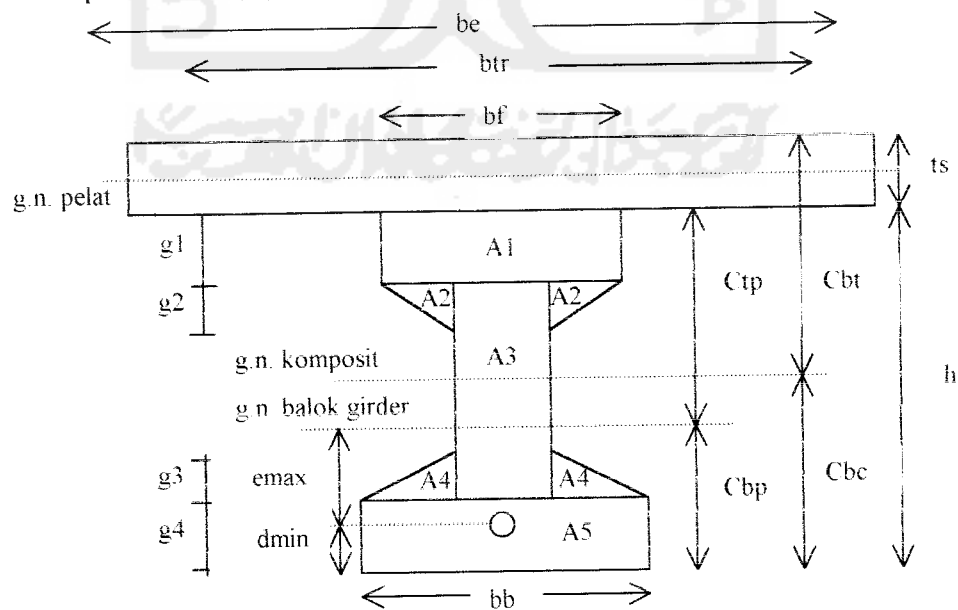
- Lebar pelat cetak (be diambil yang terkecil)

$$be \leq bf + 12 \cdot ts$$

$$be \leq S$$

$$be \leq L / 4$$

- Tebal pelat cetak (ts) = 200 mm



Tegangan ijin beton :

$$f'_{ci} = 0,90 \cdot 45 = 40,5 \text{ Mpa}$$

a. Saat awal (transfer)

$$\text{i. serat tarik (fti)} = 0,25 \cdot \sqrt{f'_{ci}} = 0,25 \cdot \sqrt{40,5} = 1,590990 \text{ MPa}$$

$$\text{ii. serat tekan (fci)} = -0,6 \cdot f'_{ci} = 0,6 \cdot 40,5 = -24,3 \text{ MPa}$$

b. Saat layan

$$\text{i. serat tarik (fts)} = 0,5 \cdot \sqrt{f'_{c}} = 0,5 \cdot \sqrt{45} = 3,354102 \text{ MPa}$$

$$\text{ii. serat tekan (fci)} = -0,45 \cdot f'_{c} = 0,45 \cdot 45 = -20,25 \text{ MPa}$$

I. Kondisi Tendon Terekat (Grouting) Digunakan Luas Tampang**Transformasi****Luas balok pracetak (Ap) :**

$$A1 = bf \cdot g1 = 510 \cdot 230 = 11730 \text{ mm}^2$$

$$A2 = 1/2 \cdot (bf - bw) \cdot g2 = 1/2 \cdot (510 - 200) \cdot 100 = 15500 \text{ mm}^2$$

$$A3 = bw \cdot (h - g1 - g4) = 200 \cdot (1100 - 230 - 250) = 124000 \text{ mm}^2$$

$$A4 = ((bb - bw)/2) \cdot g3 = ((550 - 200)/2) \cdot 110 = 19250 \text{ mm}^2$$

$$A5 = bb \cdot g4 = 550 \cdot 250 = 137500 \text{ mm}^2$$

$$Ap = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 = 413550 \text{ mm}^2$$

Luas tendon transformasi (At) :

$$\text{Beton : } E_c = 4730 \cdot \sqrt{f'_{c\text{balok}}} \text{ MPa}$$

$$\text{Baja : } E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

$$n_t = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2 \cdot 10^5}{4730 \cdot \sqrt{45}} = 6,303222 \sim 7$$

$$At = (n_t - 1) \cdot A_{ps} = (7 - 1) \cdot 3000 = 18000 \text{ mm}^2$$

Propertis tampang balok pracetak :

Jarak garis netral balok pracetak ke serat bawah:

$$\begin{aligned}
 C_{bp} &= [((A_1 \cdot (h - g_1/2))) + (A_2 \cdot (h - g_1 - (2/3) \cdot g_2)) \\
 &\quad + (A_3 \cdot (((h - g_1 - g_4)/2) + g_4)) + (A_4 \cdot ((2/3 \cdot g_3) + g_4)) \\
 &\quad + (A_5 \cdot (g_4/2)) + (A_t \cdot d_{min})] / (A_p + A_t) \\
 C_{bp} &= [((117300 \cdot (1100 - (230/2))) + (15500 \cdot (1100 - 230 - (2/3 \cdot 100))) \\
 &\quad + (124000 \cdot (((1100 - 230 - 250)/2) + 250)) \\
 &\quad + (19250 \cdot ((2/3 \cdot 110) + 250)) \\
 &\quad + (137500 \cdot (250/2)) + (18000 \cdot 180)] / (413550 + 18000) \\
 &= [(220843833,3) + (3240000)] / (431550) \\
 &= 519,253466 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Jarak garis netral balok pracetak ke serat atas :

$$C_{tp} = h - C_{bp} = 1100 - 519,253466 = 580,746543 \text{ mm}$$

Jarak pusat titik berat tendon ke garis netral balok pracetak :

$$e_{max} = C_{bp} - d_{min} = 519,253466 - 180 = 339,253466 \text{ mm}$$

Inersia balok pracetak :

$$\begin{aligned}
 I_p &= [(1/12 \cdot b_f \cdot g_1^3 + A_1 \cdot (C_{tp} - (1/2 \cdot g_1))^2) \\
 &\quad + ((1/36 \cdot ((b_f - b_w)/2) \cdot g_2^3) \cdot 2 + A_2 \cdot (C_{tp} - g_1 - (2/3 \cdot g_2))^2) \\
 &\quad + (1/12 \cdot b_w \cdot (h - g_1 - g_4)^3 + A_3 \cdot (C_{tp} - ((h - g_1 - g_4)/2))^2) \\
 &\quad + ((1/36 \cdot ((b_b - b_w)/2) \cdot g_3^3) \cdot 2 + A_4 \cdot (C_{bp} - g_4 - (2/3 \cdot g_3))^2) \\
 &\quad + (1/12 \cdot b_b \cdot g_4^3 + A_5 \cdot (C_{bp} - g_4/2)^2) \\
 &\quad + (A_t \cdot e^2)]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_p = & \left[(1/12 \cdot 510 \cdot 230^3 + 117300 \cdot (580,746534 - (1/2 \cdot 230))^2) \right. \\
 & + ((1/36 \cdot ((510 - 200)/2) \cdot 100^3) \cdot 2 \\
 & + 15500 \cdot (580,746534 - 230 - (2/3 \cdot 100))^2) \\
 & + (1/12 \cdot 200 \cdot (1100 - 230 - 250)^3 \\
 & + 124000 \cdot (580,746534 - ((1100 - 230 - 250)/2))^2) \\
 & + ((1/36 \cdot ((550 - 200)/2) \cdot 110^3) \cdot 2 \\
 & + 19250 \cdot (519,253466 - 250 - (2/3 \cdot 110))^2) \\
 & \left. + (1/12 \cdot 550 \cdot 250^3 + 137500 \cdot (519,253466 - 250/2)^2) \right. \\
 & \left. + (18000 \cdot 339,253466^2) \right] \\
 I_p = & 25961794020 + 1259482362 + 13061790360 + 751845721,7 \\
 & + 22088567710 + 2071672455 \\
 = & 6,519515263 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

Modulus tampang balok pracetak ke serat atas :

$$S_{tp} = \frac{I}{C_{tp}} = \frac{6,519515263 \cdot 10^{10}}{580,746534} = 112260941,4 \text{ mm}^3$$

Modulus tampang balok pracetak ke serat bawah :

$$S_{bp} = \frac{I}{C_{bp}} = \frac{6,519515263 \cdot 10^{10}}{519,253466} = 125555546,4 \text{ mm}^3$$

$$r^2 = \frac{I_p}{(A_p + A_t)} = \frac{6,519515263 \cdot 10^{10}}{(413550 + 18000)} = 151072,0719 \text{ mm}^2$$

Luas tampang komposit :

$$n = \frac{4730 \cdot \sqrt{f_c \text{ pelat}}}{4730 \cdot \sqrt{f_c \text{ balok}}} = \frac{4730 \cdot \sqrt{28}}{4730 \cdot \sqrt{45}} = 0,788810637$$

$$b_{tr} = b_e \cdot n$$

$$A_{\text{pelat}} = b_e \cdot n \cdot t_s = 2910 \cdot 0,788810637 \cdot 200 = 459087,7907 \text{ mm}^2$$

$$A_p + A_t + A_{\text{pelat}} = 413550 + 18000 + 459087,7907 = 890637,7907 \text{ mm}^2$$

Propertis tampang komposit :

Jarak garis netral komposit ke serat bawah :

$$C_{bc} = [(A_{\text{pelat}} \cdot (h + 1/2 \cdot t_s)) + ((A_p + A_t) \cdot C_{bp})] / (A_{\text{pelat}} + A_p + A_t)$$

$$\begin{aligned} C_{bc} &= [(459087,7907 \cdot (1100 + 1/2 \cdot 200)) \\ &\quad + ((413550 + 18000) \cdot 519,253466)] / (459087,7907 + 413550 \\ &\quad + 18000) \\ &= [(550905348,8) + (224083833,3)] / (890637,7907) \\ &= 774989182,1 / (890637,7907) \\ &= 870,150796 \text{ mm} \end{aligned}$$

Jarak garis netral komposit ke serat atas :

$$C_{tc} = (h + t_s) - C_{bc} = (1100 + 200) - 870,150796 = 429,849204 \text{ mm}$$

Inersia komposit :

$$I_c = [(1/12 \cdot b_e \cdot n \cdot t_s^3 + A_{\text{pelat}} \cdot (C_{tc} - 1/2 \cdot t_s)^2) \\ + (I_p + (A_p + A_t) \cdot (C_{bc} - C_{bp})^2)]$$

$$\begin{aligned} I_c &= [(1/12 \cdot 2910 \cdot 0,788810637 \cdot 200^3 \\ &\quad + 459087,7907 \cdot (429,849204 - 1/2 \cdot 200)^2)] \\ &\quad + (6,519515263 \cdot 10^{10} \\ &\quad + (413550 + 18000) \cdot (870,150796 - 519,253466)^2)] \end{aligned}$$

$$= [(5,14792726 \cdot 10^{10}) + (1,18331445 \cdot 10^{11})]$$

$$I_c = 1,698107176 \cdot 10^{11} \text{ mm}^4$$

Modulus tampang komposit ke serat atas :

$$S_{tc} = \frac{I_c}{C_{tc}} = \frac{1,698107176 \cdot 10^{11}}{429,849204} = 395047184 \text{ mm}^3$$

Modulus tampang komposit ke serat bawah :

$$S_{bc} = \frac{I_c}{C_{bc}} = \frac{1,698107176 \cdot 10^{11}}{870,150796} = 195150907,6 \text{ mm}^3$$

Beban-beban yang bekerja :

$$\begin{aligned} \text{Beban berat sendiri girder (MG)} &= A_p \cdot w_{bt} \\ &= 413550 \cdot 10^{-6} \cdot 23 = 9,511650 \text{ KN/m} \end{aligned}$$

$$\text{Beban mati (WD)} = 10 \text{ KN/m}$$

$$\text{Beban hidup (WL)} = 16 \text{ KN/m}$$

$$\text{Beban berat sendiri pelat (WS)} = (s \cdot t_s) = (3000 \cdot 200) \cdot 23 = 13,8 \text{ KN/m}$$

Momen lentur maksimum :

$$M_G = \frac{1}{8} \cdot W_G \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 9,511650 \cdot 18^2 = 385,22185 \text{ KNm}$$

$$M_D = \frac{1}{8} \cdot W_D \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 10 \cdot 18^2 = 405 \text{ KNm}$$

$$M_L = \frac{1}{8} \cdot W_L \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 16 \cdot 18^2 = 648 \text{ KNm}$$

$$M_S = \frac{1}{8} \cdot W_S \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 13,8 \cdot 18^2 = 558,9 \text{ KNm}$$

Pada saat transfer beban mati telah bekerja 15 % :

$$M_O = M_G + 0,15 \cdot M_D$$

$$M_O = 385,221825 + 0,15 \cdot 405 = 445,971825 \text{ KNm}$$

Pada saat layan (penampang belum komposit) :

$$\begin{aligned} MT &= MG + 0,15 \cdot MD + MS \\ &= 385,221825 + 0,15 \cdot 405 + 558,9 = 1004,771825 \text{ KNm} \end{aligned}$$

Pada saat layan (penampang komposit) :

$$\begin{aligned} MT &= MG + 0,15 \cdot MD + MS \text{ bekerja pada balok pracetak} \\ &\text{(penampang belum komposit)} \end{aligned}$$

$$= 385,221825 + 0,15 \cdot 405 + 558,9 = 1004,771825 \text{ KNm}$$

$$\begin{aligned} MT &= MD + ML \text{ bekerja pada penampang balok pracetak} \\ &\text{dan pelat (penampang komposit)} \end{aligned}$$

$$= 405 + 648 = 1053 \text{ KNm}$$

Gaya prategang awal pada tendon :

$$f_{po} = 0,74 \cdot f_{pu} = 0,74 \cdot 1800 = 1332 \text{ MPa}$$

$$P_o = A_{ps} \cdot f_{po} = 3000 \cdot 1332 = 3996000 \text{ N}$$

Gaya prategang efektif pada tendon :

$$\text{Rasio kehilangan prategang (R)} = (1 - \text{LOF}) = (1 - 18\%) = 0,82$$

$$P_e = R \cdot P_o = 0,82 \cdot 3996000 = 3276720 \text{ N}$$

1. Tegangan -Tegangan yang Terjadi :

a. Saat transfer

i. Tegangan serat atas

$$f_t = -\frac{P_o}{(A_p + A_t)} \cdot \left(1 - \frac{e_{max} \cdot C_{tp}}{r_p^2} \right) - \frac{M_O \cdot 10^6}{S_{tp}}$$

$$f_t = -\frac{3996000}{431550} \cdot \left(1 - \frac{339,253466 \cdot 580,746534}{151072,0719} \right) - \frac{445,971825 \cdot 10^6}{1,12260941,4 \cdot 10^8}$$

$$f_t = -9,259645 + 12,075944 - 3,972636$$

$$f_t = -1,156337 \text{ MPa} \leq f_{ci} = -24,3 \text{ MPa} \quad \text{AMAN}$$

ii. Tegangan serat bawah

$$f_b = -\frac{P_o}{(A_p + A_t)} \cdot \left(1 + \frac{e_{\max} \cdot C_{bp}}{r^2} \right) + \frac{M_O \cdot 10^6}{S_{bp}}$$

$$f_b = -\frac{3996000}{431550} \cdot \left(1 + \frac{339,253466 \cdot 519,253466}{151072,0719} \right) + \frac{445,971825 \cdot 10^6}{1,255555464 \cdot 10^8}$$

$$f_b = -9,259645 - 10,797268 + 3,551988$$

$$f_b = -16,504925 \text{ MPa} \leq f_{ci} = -24,3 \text{ MPa} \quad \text{AMAN}$$

b. saat layan (penampang belum komposit)

i. Tegangan serat atas

$$f_t = -\frac{P_e}{(A_p + A_t)} \cdot \left(1 - \frac{e_{\max} \cdot C'_{tp}}{r_p^2} \right) - \frac{(M_O + M_S) \cdot 10^6}{S_{tp}}$$

$$f_t = -\frac{3276720}{431550} \cdot \left(1 - \frac{339,253466 \cdot 580,746534}{151072,0719} \right) - \frac{1004,771825 \cdot 10^6}{1,122609414 \cdot 10^8}$$

$$f_t = -7,592909 + 9,902274 - 8,950324$$

$$f_t = -6,640959 \text{ MPa} \leq f_{ci} = -20,25 \text{ MPa} \quad \text{AMAN}$$

ii. Tegangan serat bawah

$$f_b = -\frac{P_e}{(A_p + A_t)} \cdot \left(1 + \frac{e_{\max} \cdot C'_{bp}}{r^2} \right) + \frac{(M_O + M_S) \cdot 10^6}{S_{bp}}$$

$$f_b = -\frac{3276720}{431550} \cdot \left(1 + \frac{339,253466 \cdot 519,253466}{151072,0719} \right) + \frac{1004,771825 \cdot 10^6}{1,255555464 \cdot 10^8}$$

$$f_b = -7,592909 - 8,853760 + 8,002608$$

$$f_b = -8,444061 \text{ MPa} \leq f_{ci} = -20,25 \text{ MPa} \quad \text{AMAN}$$

c. saat layan (penampang komposit) :

i. Tegangan serat atas

$$f_t = -\frac{P_e}{(A_p + A_t)} \cdot \left(1 - \frac{e_{\max} \cdot C_{tp}}{r^2}\right) - \frac{(M_O + M_S) \cdot 10^6}{S_{tp}} - \frac{(M_D + M_L) \cdot 10^6}{S_{tc}}$$

$$f_t = -\frac{3276720}{431550} \cdot \left(1 - \frac{339,253466 \cdot 580,746534}{151072,0719}\right) - \frac{1004,771825 \cdot 10^6}{1,122609414 \cdot 10^8} - \frac{(1053) \cdot 10^6}{3,95047184 \cdot 10^8}$$

$$f_t = -7,592909 + 9,902274 - 8,950324 - 2,665504$$

$$f_t = -9,306463 \text{ MPa} \leq f_{ci} = -20,25 \text{ MPa} \quad \text{AMAN}$$

ii. Tegangan serat bawah

$$f_b = -\frac{P_e}{(A_p + A_t)} \cdot \left(1 + \frac{e_{\max} \cdot C_{bp}}{r^2}\right) + \frac{(M_O + M_S) \cdot 10^6}{S_{bp}} + \frac{(M_D + M_L) \cdot 10^6}{S_{bc}}$$

$$f_b = -\frac{3276720}{431550} \cdot \left(1 + \frac{339,253466 \cdot 519,253466}{151072,0719}\right) + \frac{1004,771825 \cdot 10^6}{1,255555464 \cdot 10^8} + \frac{(1053) \cdot 10^6}{1,951509076 \cdot 10^8}$$

$$f_b = -7,592909 - 8,853760 + 8,002608 + 5,395824$$

$$f_b = -3,048237 \text{ MPa} \leq f_{ci} = -20,25 \text{ MPa} \quad \text{AMAN}$$

Kuat Lentur Penampang

Baja relaksasi rendah : $\gamma_p = 40$

Diperkirakan seluruh beton tekan berada di flens.

Rasio baja :

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{S \cdot d_p} = \frac{3000}{2910 \cdot 1120} = 0,000920$$

Tendon terekat, tulangan non prategang diabaikan, maka :

$$\beta_1 = 0,85 - 0,008 \cdot (f'_c - 30) = 0,85 - 0,008 \cdot (45 - 30) = 0,73$$

$$f_{ps} = f_{pu} \cdot \left[1 - \frac{\gamma_p \cdot \rho_p \cdot f_{pu}}{\beta_1 \cdot f'_c} \right] = 1800 \cdot \left[1 - \frac{0,40 \cdot 0,000920 \cdot 1800}{0,73 \cdot 45} \right]$$

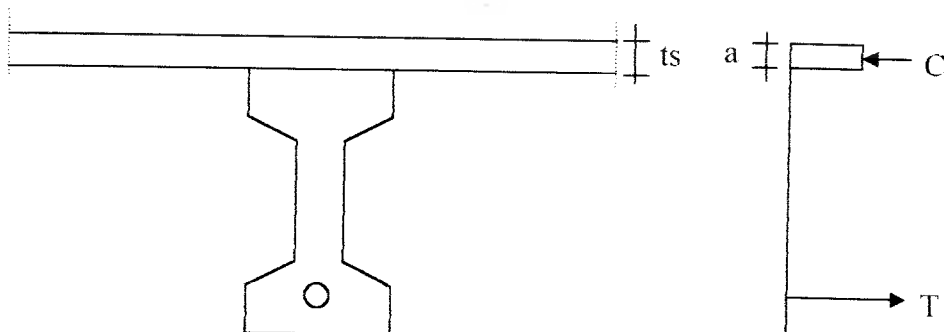
$$= 1763,70411 \text{ MPa} > f_y = 0,85 \cdot f_{pu} = 0,85 \cdot 1800 = 1530 \text{ MPa}$$

maka dipakai $f_{ps} = 1530 \text{ MPa}$

Gaya-gaya dalam :

$$T = A_{ps} \cdot f_{ps} = 3000 \cdot 1530 = 4590000 \text{ N}$$

$$C = 0,85 \cdot f'_c \cdot b_e \cdot a = 0,85 \cdot 45 \cdot (b_e \cdot a) = 38,25 (b_e \cdot a)$$



Dari keseimbangan gaya dalam $C = T$ diperoleh :

$$38,25 \cdot (b_e \cdot a) = 4590000$$

$$a = \frac{4590000}{38,25 \cdot b_e} = \frac{4590000}{38,25 \cdot 2910} = 41,237113 \text{ mm} < t_s = 200 \text{ mm}$$

maka anggapan di atas benar

Periksa rasio tulangan :

$$\omega = \frac{\rho_p \cdot f_{ps}}{f'_c} = \frac{0,000920 \cdot 1530}{45} = 0,03128 < 0,35 \cdot \beta_1 = 0,2555 \quad \text{O.K.}$$

Kapasitas penampang :

$$\begin{aligned} M_n &= T \cdot \left(d_p - \frac{a}{2} \right) = 4590000 \cdot \left(1120 - \frac{41,237113}{2} \right) = 5046160826 \text{ mm} \\ &= 5046,160826 \text{ KNm} \end{aligned}$$

Akibat beban-beban yang bekerja :

$$M_u = 1,2 \cdot (M_S + M_G + M_D) + 1,6 \cdot (M_L)$$

$$\begin{aligned} M_u &= 1,2 \cdot (558,9 + 385,221825 + 405) + 1,6 \cdot (648) \\ &= 2655,746190 \text{ KNm} \end{aligned}$$

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} = \frac{2655,746190}{0,85}$$

$$= 3124,407282 \text{ KNm (kapasitas momen yang diperlukan)}$$

$$< 5046,160826 \text{ KNm (kapasitas momen yang tersedia) } \quad \text{AMAN}$$

Menentukan Tata Letak Tendon :

Ditinjau pada tengah bentang, seperempat bentang dan ujung balok.

a. Tengah bentang : $M = \frac{1}{8} \cdot W \cdot L^2$

b. Seperempat bentang : $M = \left(\frac{1}{2} \cdot W \cdot L^2\right) \cdot \frac{L}{4} - \left(W \cdot \frac{L}{4} \cdot \frac{L}{8}\right) = \frac{3}{32} \cdot W \cdot L^2$

c. Pada ujung balok (timpuan) : $M = 0$

Momen-momen yang yterjadi dapat dilihat pada tabel 4.6 berikut ini :

Tabel 4.6 Momen-momen yang terjadi pada balok I Bebas komposit pascatarik

Beban (KN/m)	Momen pada (KNm)		
	Tengah Bentang	Seperempat Bentang	Ujung Balok
Beban Gelagar : 9,511650	385,221825	288,916369	0
Berat Pelat : 13,8	558,9	419,175	0
Beban Mati : 10	405	303,75	0
Beban Hidup : 16	648	486	0
MO = MG +15 % . MD	445,971825	334,478869	0
MT = MG + MS + MD + ML	1997,121825	1497,841369	0

Batas kern atas :

$$K_t = \frac{r_p^2}{C_{bp}} = \frac{151072,0719}{519,253466} = 290,940902 \text{ mm}$$

Batas kern bawah :

$$K_b = \frac{r_p^2}{C_{tp}} = \frac{151072,0719}{580,746534} = 260,134254 \text{ mm}$$

Batas bawah letak tendon :

$$a_{\min} = \frac{M_O}{P_O} \text{ dan } e_b = a_{\min} + K_b$$

Di sini $MO = MG + 15 \% \cdot MD$ (karena pada saat transfer beban mati telah bekerja 15 %).

Jika diperkenankan terjadi tegangan tarik pada beton saat transfer, maka lebar daerah tendon bertambah sebesar :

$$eb' = \frac{f_{ti} \cdot (A_p + A_t) \cdot K_b}{P_o} \quad \text{dan} \quad eb_l = eb + eb' = a_{\min} + K_b + eb'$$

Tabel 4.7 Batas bawah letak aman tendon

Bagian Penampang	Tidak Terjadi Tarik		Boleh Terjadi Tarik	
	a_{\min} (mm)	eb (mm)	eb' (mm)	eb _l (mm)
Tengah bentang	111,604561	371,738825	49,989402	421,728227
Seperempat bentang	83,703421	343,837685	49,989402	393,827087
Ujung balok	0	260,134264	49,989402	310,123666

Batas atas letak tendon :

$$a_{\max} = \frac{MT}{P_e} \quad \text{dan} \quad et = a_{\max} - K_t$$

Jika diperkenankan terjadi tegangan tarik pada beton saat layan, maka lebar daerah tendon bertambah sebesar :

$$et' = \frac{f_{ts} \cdot (A_p + A_t) \cdot K_t}{P_e} \quad \text{dan} \quad et_l = et - et' = a_{\max} - K_t - et'$$

selengkapnya letak batas atas daerah aman tendon dan apabila tegangan tarik diijinkan dapat dilihat pada tabel 4.8 berikut ini :

Tabel 4.8 Batas atas daerah aman letak tendon dan jika boleh terjadi teg. tarik

Bagian Penampang	Tidak Terjadi Tarik		Boleh Terjadi Tarik	
	a_{\max} (mm)	et (mm)	et' (mm)	etl (mm)
Tengah bentang	609,488093	318,547191	128,520626	190,026565
Seperempat bentang	457,116070	166,175168	128,520626	37,654542
Ujung balok	0	-290,940902	128,520626	-419,461528

Menghitung jumlah strand dalam satu tendon :

- diameter kawat (D_r) = 15,24 mm
- luas kawat (A_r) = $1/4 \cdot \pi \cdot D_r^2 = 182,4146925 \text{ mm}^2$
- jumlah untaian kawat (n_r) = 7 untaian kawat
- jumlah strand dalam satu tendon = $A_{ps} / (A_r \cdot n_r)$
 $= 2,349435 \sim 3$ buah strand

II. Tendon Tak Terekat (Ungrouting) Digunakan Luas Penampang Netto**Luas balok pracetak (A_p) :**

$$A_1 = b_f \cdot g_1 = 510 \cdot 230 = 117300 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = 1/2 (b_f - b_w) \cdot g_2 = 1/2 (510 - 200) \cdot 100 = 15500 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = b_w \cdot (h - g_1 - g_4) = 200 \cdot (1100 - 230 - 250) = 124000 \text{ mm}^2$$

$$A_4 = ((b_b - b_w)/2) \cdot g_3 = ((550 - 200)/2) \cdot 110 = 19250 \text{ mm}^2$$

$$A_5 = b_b \cdot g_4 = 550 \cdot 250 = 137500 \text{ mm}^2$$

$$A_p = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 = 413550 \text{ mm}^2$$

Luas tendon (An) :

$$A_n = 1/4 \cdot \pi \cdot D^2 = 1/4 \cdot \pi \cdot 90^2 = 6361,725124 \text{ mm}^2$$

Propertis tampang balok pracetak :

Jarak garis netral balok pracetak ke serat bawah :

$$\begin{aligned} C_{bp} &= [((A_1 \cdot (h - g_1/2))) + (A_2 \cdot (h - g_1 - ((2/3) \cdot g_2))) \\ &\quad + (A_3 \cdot (((h - g_1 - g_4)/2) + g_4)) + (A_4 \cdot ((2/3 \cdot g_3) + g_4)) \\ &\quad + (A_5 \cdot (g_4/2)) - (A_n \cdot d_{min})] / (A_p - A_n) \\ C_{bp} &= [((117300 \cdot (1100 - (230/2))) + (15500 \cdot (1100 - 230 - (2/3 \cdot 100))) \\ &\quad + (124000 \cdot (((1100 - 230 - 250)/2) + 250)) \\ &\quad + (19250 \cdot ((2/3 \cdot 110) + 250)) \\ &\quad + (137500 \cdot (250/2)) - (6361,725124 \cdot 180)] / (413550 - 6361,725124) \\ &= [(220843833,3) - (1145110,522)] / (407188,2749) \\ &= 539,550710 \text{ mm} \end{aligned}$$

Jarak garis netral balok pracetak ke serat atas :

$$C_{tp} = h - C_{bp} = 1100 - 539,550710 = 560,449290 \text{ mm}$$

Jarak pusat titik berat tendon ke garis netral balok pracetak :

$$e_{max} = C_{bp} - d_{min} = 539,550710 - 180 = 359,550710 \text{ mm}$$

Inersia balok pracetak:

$$\begin{aligned} I_p &= [(1/12 \cdot b_f \cdot g_1^3 + A_1 \cdot (C_{tp} - (1/2 \cdot g_1))^2) \\ &\quad + ((1/36 \cdot ((b_f - b_w)/2) \cdot g_2^3) \cdot 2 + A_2 \cdot (C_{tp} - g_1 - (2/3 \cdot g_2))^2) \\ &\quad + (1/12 \cdot b_w \cdot (h - g_1 - g_4)^3 + A_3 \cdot (C_{tp} - ((h - g_1 - g_4)/2))^2) \\ &\quad + ((1/36 \cdot ((b_b - b_w)/2) \cdot g_3^3) \cdot 2 + A_4 \cdot (C_{bp} - g_4 - (2/3 \cdot g_3))^2) \end{aligned}$$

$$+ (1/12 \cdot bb \cdot g^3 + A5 \cdot (Cbp - g/2)^2) \\ - (1/64 \cdot \pi \cdot D^2 + An \cdot cmax^2)]$$

$$Ip = [(1/12 \cdot 510 \cdot 230^3 + 117300 \cdot (560,449290 - (1/2 \cdot 230))^2) \\ + ((1/36 \cdot ((510 - 200)/2) \cdot 100^3) \cdot 2 \\ + 15500 \cdot (560,449290 - 230 - (2/3 \cdot 100))^2) \\ + (1/12 \cdot 200 \cdot (1100 - 230 - 250)^3 \\ + 124000 \cdot (560,449290 - ((1100 - 230 - 250)/2))^2) \\ + ((1/36 \cdot ((550 - 200)/2) \cdot 110^3) \cdot 2 \\ + 19250 \cdot (539,550710 - 250 - (2/3 \cdot 110))^2) \\ + (1/12 \cdot 550 \cdot 250^3 + 137500 \cdot (539,550710 - 250/2)^2) \\ - (1/64 \cdot \pi \cdot 90^2 + 6361,725124 \cdot 359,550710^2)]$$

$$Ip = 23792358210 + 1087120833 + 11750014340 + 912876891,8 \\ - 24345835870 - 822423311 \\ = 6,106578283 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$$

Modulus tampang balok pracetak ke serat atas :

$$Stp = \frac{I}{Ctp} = \frac{6,106578283 \cdot 10^{10}}{560,449290} = 108958622,9 \text{ mm}^3$$

Modulus tampang balok pracetak ke serat bawah :

$$Sbp = \frac{I}{Cbp} = \frac{6,106578283 \cdot 10^{10}}{539,550710} = 113178950 \text{ mm}^3$$

$$r^2 = \frac{Ip}{(Ap - An)} = \frac{6,106578283 \cdot 10^{10}}{(413550 - 6361,725124)} = 149969,4038 \text{ mm}^2$$

Luas tampang komposit :

$$n = \frac{4730 \cdot \sqrt{f'c \text{ pelat}}}{4730 \cdot \sqrt{f'c \text{ balok}}} = \frac{4730 \cdot \sqrt{28}}{4730 \cdot \sqrt{45}} = 0,788810637$$

$$b_{tr} = b_e \cdot n$$

$$A_{pelat} = b_e \cdot n \cdot t_s = 2910 \cdot 0,788810637 \cdot 200 = 459087,7907 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} A_p - A_n + A_{pelat} &= 413550 - 6361,725124 + 459087,7907 \\ &= 866276,0656 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Propertis tampang komposit :

Jarak garis netral komposit ke serat bawah :

$$C_{bc} = [(A_{pelat} \cdot (h + 1/2 \cdot t_s)) + ((A_p - A_n) \cdot C_{bp})] / (A_{pelat} + A_p - A_n)$$

$$\begin{aligned} C_{bc} &= [(459087,7907 \cdot (1100 + 1/2 \cdot 200)) \\ &\quad + ((413550 - 6361,725124) \cdot 539,550710)] / (459087,7907 + \\ &\quad 413550 - 6361,725124) \\ &= [(550905348,8) + (219698722,8)] / (866276,0656) \\ &= 770604071,6 / (866276,0656) \\ &= 889,559463 \text{ mm} \end{aligned}$$

Jarak garis netral komposit ke serat atas :

$$C_{tc} = (h + t_s) - C_{bc} = (1100 + 200) - 889,559463 = 410,440537 \text{ mm}$$

Inersia komposit :

$$\begin{aligned} I_c &= [(1/12 \cdot b_e \cdot n \cdot t_s^3 + A_{pelat} \cdot (C_{tc} - 1/2 \cdot t_s)^2) \\ &\quad + (I_p + (A_p - A_n) \cdot (C_{bc} - C_{bp})^2)] \\ I_c &= [(1/12 \cdot 2910 \cdot 0,788810637 \cdot 200^3 \\ &\quad + 459087,7907 \cdot (410,440537 - 1/2 \cdot 200)^2)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ (6,106578283 \cdot 10^{10}) \\
 &+ (413550 - 6361,725124) \cdot (889,559463 - 539,550710)^2] \\
 &= [(4,577411042 \cdot 10^{10}) + (1,109488414 \cdot 10^{11})] \\
 I_c &= 1,567229518 \cdot 10^{11} \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

Modulus tampang komposit ke serat atas :

$$S_{tc} = \frac{I_c}{C_{tc}} = \frac{1,567229518 \cdot 10^{11}}{410,440537} = 381840821,5 \text{ mm}^3$$

Modulus tampang komposit ke serat bawah :

$$S_{bc} = \frac{I_c}{C_{bc}} = \frac{1,567229518 \cdot 10^{11}}{889,559463} = 176180411 \text{ mm}^3$$

Beban-beban yang bekerja :

$$\begin{aligned}
 \text{Beban berat sendiri girder (MG)} &= (A_p - A_n) \cdot w_{bt} \\
 &= (413550 - 6361,725124) \cdot 10^{-6} \cdot 23 \\
 &= (407188,2749) \cdot 10^{-6} \cdot 23 \\
 &= 9,365330 \text{ KN/m}
 \end{aligned}$$

$$\text{Beban mati (WD)} = 10 \text{ KN/m}$$

$$\text{Beban hidup (WL)} = 16 \text{ KN/m}$$

$$\text{Beban berat sendiri pelat (WS)} = (S \cdot t_s) = (3000 \cdot 200) \cdot 23 = 13,8 \text{ KN/m}$$

Momen lentur maksimum :

$$MG = \frac{1}{8} \cdot W_G \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 9,3653300 \cdot 18^2 = 379,295865 \text{ KNm}$$

$$MD = \frac{1}{8} \cdot W_D \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 10 \cdot 18^2 = 405 \text{ KNm}$$

$$M_L = \frac{1}{8} \cdot W_L \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 16 \cdot 18^2 = 648 \text{ KNm}$$

$$M_S = \frac{1}{8} \cdot W_S \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 13,8 \cdot 18^2 = 558,9 \text{ KNm}$$

Pada saat transfer beban mati telah bekerja 15 % :

$$M_O = M_G + 0,15 \cdot M_D$$

$$M_O = 379,295865 + 0,15 \cdot 405 = 440,045865 \text{ KNm}$$

Pada saat layan (penampang belum komposit) :

$$M_T = M_G + 0,15 \cdot M_D + M_S$$

$$= 379,295865 + 0,15 \cdot 405 + 558,9 = 998,945865 \text{ KNm}$$

Pada saat layan (penampang komposit) :

$$M_T = M_G + 0,15 \cdot M_D + M_S \text{ bekerja pada balok pracetak}$$

(penampang belum komposit)

$$= 379,295865 + 0,15 \cdot 405 + 558,9 = 998,945865 \text{ KNm}$$

$$M_T = M_D + M_L \text{ bekerja pada penampang balok pracetak}$$

dan pelat (penampang komposit)

$$= 405 + 648 = 1053 \text{ KNm}$$

Gaya prategang awal pada tendon :

$$f_{po} = 0,74 \cdot f_{pu} = 0,74 \cdot 1800 = 1332 \text{ MPa}$$

$$P_o = A_{ps} \cdot f_{po} = 3000 \cdot 1332 = 3996000 \text{ N}$$

Gaya prategang efektif pada tendon :

$$\text{Rasio kehilangan prategang (R)} = (1 - \text{LOF}) = (1 - 18 \%) = 0,82$$

$$P_e = R \cdot P_o = 0,82 \cdot 3996000 = 3276720 \text{ N}$$

1. Tegangan -Tegangan yang Terjadi :

a. Saat transfer

i. Tegangan serat atas

$$f_t = -\frac{P_o}{(A_p - A_n)} \cdot \left(1 - \frac{e_{max} \cdot C_{tp}}{r^2}\right) - \frac{M_O \cdot 10^6}{S_{tp}}$$

$$f_t = -\frac{3996000}{407188,2749} \cdot \left(1 - \frac{359,550710 \cdot 560,449290}{149969,4038}\right) - \frac{440,045865 \cdot 10^6}{1,089586229 \cdot 10^8}$$

$$f_t = -9,813642 + 13,186333 - 4,038651$$

$$f_t = -0,66596 \text{ MPa} \leq f_{ci} = -24,3 \text{ MPa} \quad \text{AMAN.}$$

ii. Tegangan serat bawah

$$f_b = -\frac{P_o}{(A_p - A_n)} \cdot \left(1 + \frac{e_{max} \cdot C_{bp}}{r^2}\right) + \frac{M_O \cdot 10^6}{S_{bp}}$$

$$f_b = -\frac{3996000}{407188,2749} \cdot \left(1 + \frac{359,550710 \cdot 539,550710}{149969,4038}\right) + \frac{440,045865 \cdot 10^6}{1,13178950 \cdot 10^8}$$

$$f_b = -9,813642 - 12,694628 + 3,888054$$

$$f_b = -18,620216 \text{ MPa} \leq f_{ci} = -24,3 \text{ MPa} \quad \text{AMAN.}$$

b. saat layan (penampang belum komposit)

i. Tegangan serat atas

$$f_t = -\frac{P_e}{(A_p - A_n)} \cdot \left(1 - \frac{e_{max} \cdot C_{tp}}{r^2}\right) - \frac{(M_O + M_S) \cdot 10^6}{S_{tp}}$$

$$f_t = -\frac{3276720}{407188,2749} \cdot \left(1 - \frac{359,550710 \cdot 560,449290}{149969,4038}\right) - \frac{998,945865 \cdot 10^6}{1,089586229 \cdot 10^8}$$

$$f_t = -8,047187 + 10,812793 - 9,168121$$

$$f_t = -6,402515 \text{ MPa} \leq f_{ci} = -20,25 \text{ MPa} \quad \text{AMAN}$$

ii. Tegangan serat bawah

$$f_b = -\frac{P_e}{(A_p - A_n)} \cdot \left(1 + \frac{e_{\max} \cdot C_{bp}}{r^2}\right) + \frac{(M_O + M_S) \cdot 10^6}{S_{bp}}$$

$$f_b = -\frac{3276720}{407188,2749} \cdot \left(1 + \frac{359,550710 \cdot 539,550710}{149969,4038}\right) + \frac{998,945865 \cdot 10^6}{1,13178950 \cdot 10^8}$$

$$f_b = -8,047187 - 10,409595 + 8,826251$$

$$f_b = -9,630531 \text{ MPa} \leq f_{ci} = -20,25 \text{ MPa} \quad \text{AMAN}$$

c. saat layan (penampang komposit)

i. Tegangan serat atas

$$f_t = -\frac{P_e}{(A_p - A_n)} \cdot \left(1 - \frac{e_{mx} \cdot C_{tp}}{r_p^2}\right) - \frac{(M_O + M_S) \cdot 10^6}{S_{tp}} - \frac{(M_D + M_L) \cdot 10^6}{S_{tc}}$$

$$f_t = -\frac{3276720}{407188,2749} \cdot \left(1 - \frac{359,550710 \cdot 560,449290}{149969,4038}\right) - \frac{998,945865 \cdot 10^6}{1,089586229 \cdot 10^8} -$$

$$\frac{(1053) \cdot 10^6}{3,818408215 \cdot 10^8}$$

$$f_t = -8,047187 + 10,812793 - 9,168121 - 2,757694$$

$$f_t = -9,160209 \text{ MPa} \leq f_{ci} = -20,25 \text{ MPa} \quad \text{AMAN}$$

ii. Tegangan serat bawah

$$f_b = -\frac{P_e}{(A_p - A_n)} \cdot \left(1 + \frac{e_{\max} \cdot C_{bp}}{r^2}\right) + \frac{(M_O + M_S) \cdot 10^6}{S_{bp}} + \frac{(M_D + M_L) \cdot 10^6}{S_{bc}}$$

$$f_b = -\frac{3276720}{407188,2749} \cdot \left(1 + \frac{359,550710 \cdot 539,550710}{149969,4038} \right) + \frac{998,945865 \cdot 10^6}{1,13178950 \cdot 10^8} +$$

$$\frac{(1053) \cdot 10^6}{1,76180411 \cdot 10^8}$$

$$f_b = -8,047187 - 10,409595 + 8,826251 + 5,976828$$

$$f_b = -3,653703 \text{ MPa} \leq f_{ci} = -20,25 \text{ MPa} \quad \text{AMAN}$$

Menentukan Kuat Lentur Penampang

Diperkirakan seluruh beton tekan berada di flens.

Rasio baja :

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{b_e \cdot d_p} = \frac{3000}{2910 \cdot 1120} = 0,000920$$

$$f_{se} = \frac{P_e}{A_{ps}} = \frac{3276720}{3000} = 1092,24 \text{ MPa} > 0,50 \cdot f_{pu} = 900 \text{ MPa}$$

Perbandingan bentang balok dengan tinggi penampang :

$$\frac{L}{H} = \frac{18000}{1300} = 13,846154 < 35$$

$$f_{ps} = f_{se} + 70 + \frac{f'_c}{100 \cdot \rho_p} = 1092,24 + 70 + \frac{45}{100 \cdot 0,000893}$$

$$= 1666,159373 \text{ MPa}$$

$$f_{ps} \leq f_y = 0,85 \cdot f_{pu} = 0,85 \cdot 1800 = 1530 \text{ MPa}$$

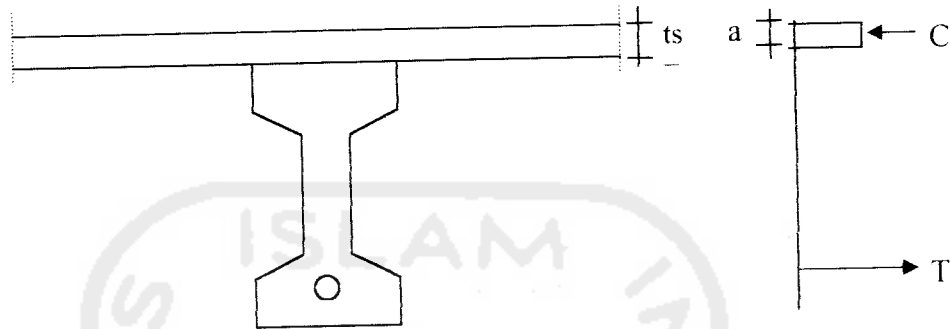
$$f_{ps} = f_{se} + 400 = 1092,24 + 400 = 1492,24 \text{ MPa}$$

$$\text{dipakai } f_{ps} = 1492,24 \text{ MPa}$$

Gaya-gaya dalam :

$$T = Aps \cdot fps = 3000 \cdot 1492,24 = 4476720 \text{ N}$$

$$C = 0,85 \cdot f'c \cdot be \cdot a = 0,85 \cdot 45 \cdot (be \cdot a) = 38,25 (be \cdot a)$$



Dari keseimbangan gaya dalam $C = T$ diperoleh :

$$38,25 \cdot (be \cdot a) = 4476720$$

$$a = \frac{4476720}{38,25 \cdot be} = \frac{4476720}{38,25 \cdot 2910} = 40,219392 \text{ mm} < ts = 200 \text{ mm}$$

maka anggapan di atas benar

Periksa rasio tulangan :

$$\omega = \frac{\rho_p \cdot fps}{f'c} = \frac{0,000920 \cdot 1530}{45} = 0,03128 < 0,35 \cdot \beta_1 = 0,2555 \quad \text{O.K.}$$

Kapasitas penampang :

$$M_n = T \cdot \left(dp - \frac{a}{2} \right) = 4476720 \cdot \left(1120 - \frac{40,219392}{2} \right)$$

$$= 4923900922 \text{ Nmm} = 4923,900922 \text{ KNm}$$

Akibat beban-beban yang bekerja :

$$M_u = 1,2 \cdot (MS + MG + MD) + 1,6 \cdot (ML)$$

$$M_u = 1,2 \cdot (558,9 + 385,221825 + 405) + 1,6 \cdot (648)$$

$$= 2648,635038 \text{ KNm}$$

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} = \frac{2648,635038}{0,85}$$

= 3116,041221 KNm (kapasitas momen yang diperlukan)

< 4923,900922 KNm (kapasitas momen yang tersedia) **AMAN**

Menentukan Tata Letak Tendon :

Ditinjau pada tengah bentang, seperempat bentang dan ujung balok.

c. Tengah bentang : $M = \frac{1}{8} \cdot W \cdot L^2$

d. Seperempat bentang : $M = \left(\frac{1}{2} \cdot W \cdot L^2 \right) \cdot \frac{L}{4} - \left(W \cdot \frac{L}{4} \cdot \frac{L}{8} \right) = \frac{3}{32} \cdot W \cdot L^2$

e. Pada ujung balok (timpuan) : $M = 0$

Selengkapnya momen-momen yang bekerja dapat dilihat pada tabel 4.9

berikut ini :

Tabel 4.9 Momen-momen yang terjadi

Beban (KN/m)	Momen pada (KNm)		
	Tengah Bentang	Seperempat Bentang	Ujung Balok
Beban Gelagar : 9,511650	379,295865	284,471899	0
Berat Pelat : 13,8	558,9	419,175	0
Beban Mati : 10	405	303,75	0
Beban Hidup : 16	648	486	0
MO = MG + 15 % . MD	440,045865	330,034399	0
MT = MG + MS + MD + ML	1991,195865	1493,396899	0

Batas kern atas :

$$K_t = \frac{r_p^2}{C_{bp}} = \frac{149969,4038}{539,550710} = 277,952380 \text{ mm}$$

Batas kern bawah :

$$K_b = \frac{r_p^2}{C_{tp}} = \frac{149969,4038}{560,449290} = 267587824 \text{ mm}$$

Batas bawah letak tendon :

$$a_{\min} = \frac{MO}{P_o} \text{ dan } eb = a_{\min} + K_b$$

Di sini $MO = MG + 15 \% \cdot MD$ (karena pada saat transfer beban mati telah bekerja 15 %)

Jika diperkenankan terjadi tegangan tarik pada beton saat transfer, maka lebar daerah tendon bertambah sebesar :

$$eb' = \frac{f_{ti} \cdot (A_p - A_n) \cdot K_b}{P_o} \text{ dan } eb1 = eb + eb' = a_{\min} + K_b + eb'$$

batas bawah letak aman tendon dapat dilihat pada tabel 4.10 berikut ini :

Tabel 4.10 Batas bawah daerah aman letak tendon

Bagian Penampang	Tidak Terjadi Tarik		Boleh Terjadi Tarik	
	a_{\min} (mm)	eb (mm)	eb' (mm)	eb1 (mm)
Tengah bentang	110,121588	377,709412	43,381409	421,090821
Seperempat bentang	82,591191	350,179015	43,381409	393,560424
Ujung balok	0	267,587824	43,381409	310,969233

Batas atas letak tendon :

$$a_{\max} = \frac{MT}{P_e} \text{ dan } et = a_{\max} - K_t$$

Jika diperkenankan terjadi tegangan tarik pada beton saat layan, maka lebar daerah tendon bertambah sebesar :

$$et' = \frac{f_{ts} \cdot (A_p - A_n) \cdot K_t}{P_e} \text{ dan } et1 = et - et' = a_{\max} - K_t - et'$$

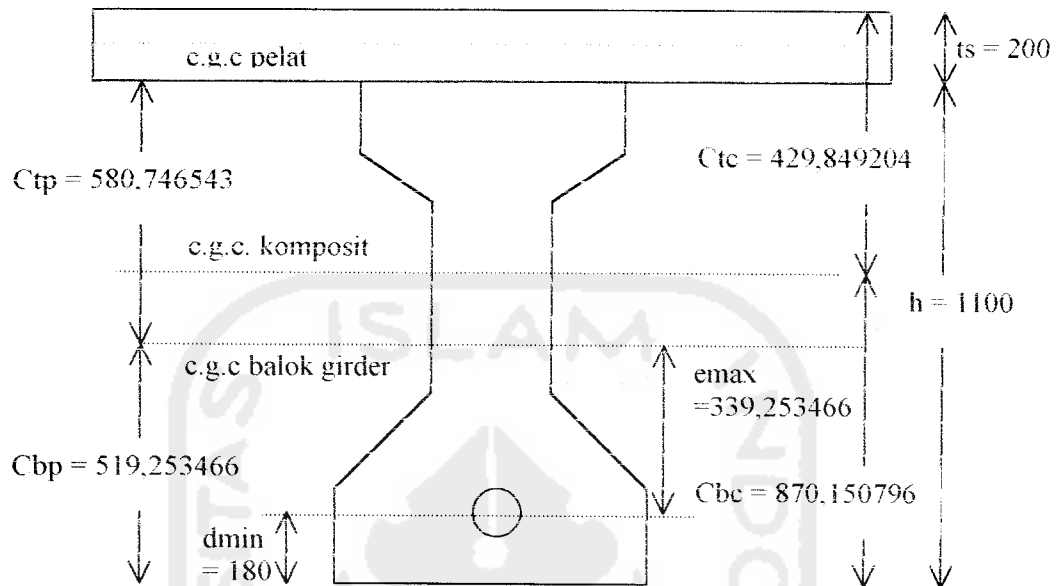
Batas bawah daerah aman letak tendon dapat dilihat pada tabel 4.11 berikut ini :

Tabel 4.11 Batas bawah daerah aman letak tendon

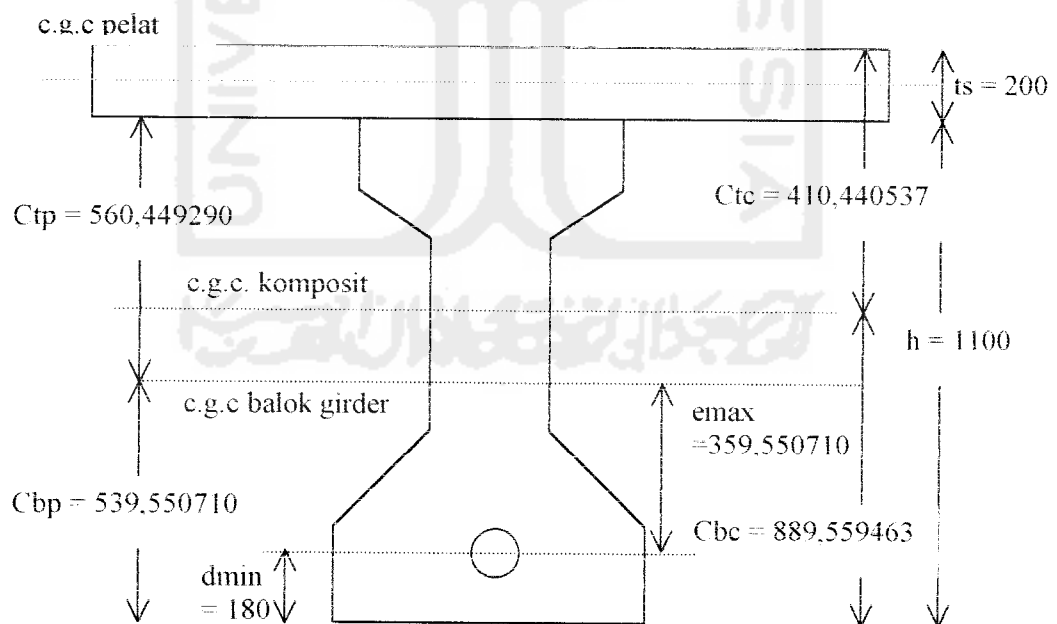
Bagian Penampang	Tidak Terjadi Tarik		Boleh Terjadi Tarik	
	a_{max} (mm)	et (mm)	et' (mm)	et ₁ (mm)
Tengah bentang	607,679590	329,727210	115,851748	213,875462
Seperempat bentang	455,759692	177,807312	115,851748	61,955564
Ujung balok	0	-277,807312	115,851743	-393,804128

Menghitung jumlah strand dalam satu tendon :

- diameter kawat (D_r) = 15,24 mm
- luas kawat (A_r) = $1/4 \cdot \pi \cdot D_r^2 = 182,4146925 \text{ mm}^2$
- jumlah untaian kawat (n_r) = 7 kawat
- jumlah tendon = $A_{ps} / (A_r \cdot n_r)$
 $= 2,349435 \sim 3$ buah strand



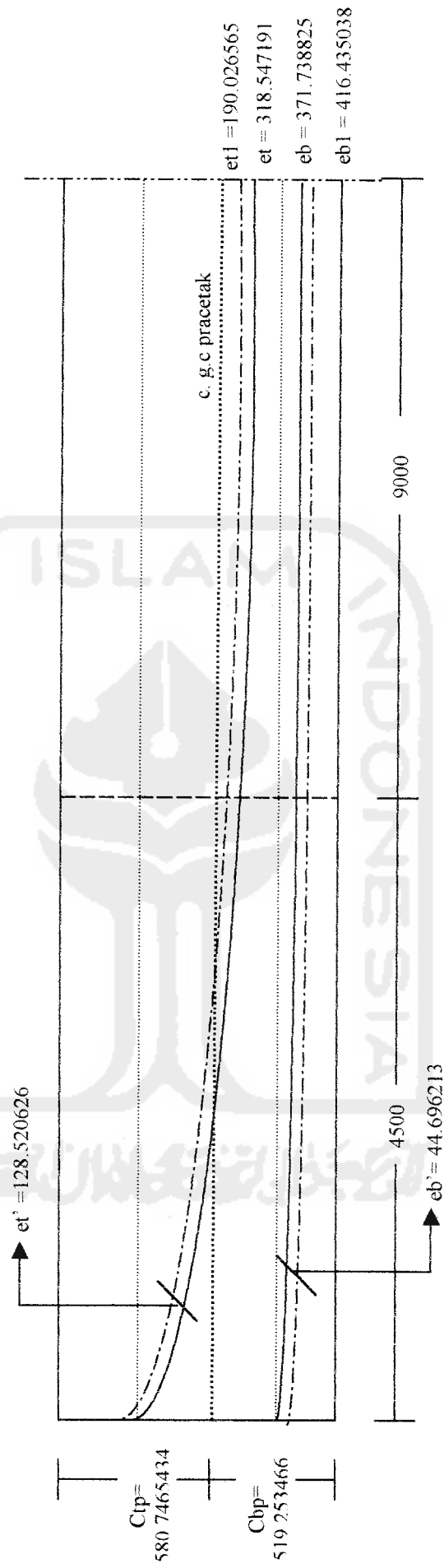
Gambar 4.3 Penampang Melintang Balok Komposit Tendon Grouting



Gambar 4.4 Penampang Melintang Balok Komposit Tendon Ungrouting

Penggambaran daerah batas letak aman tendon

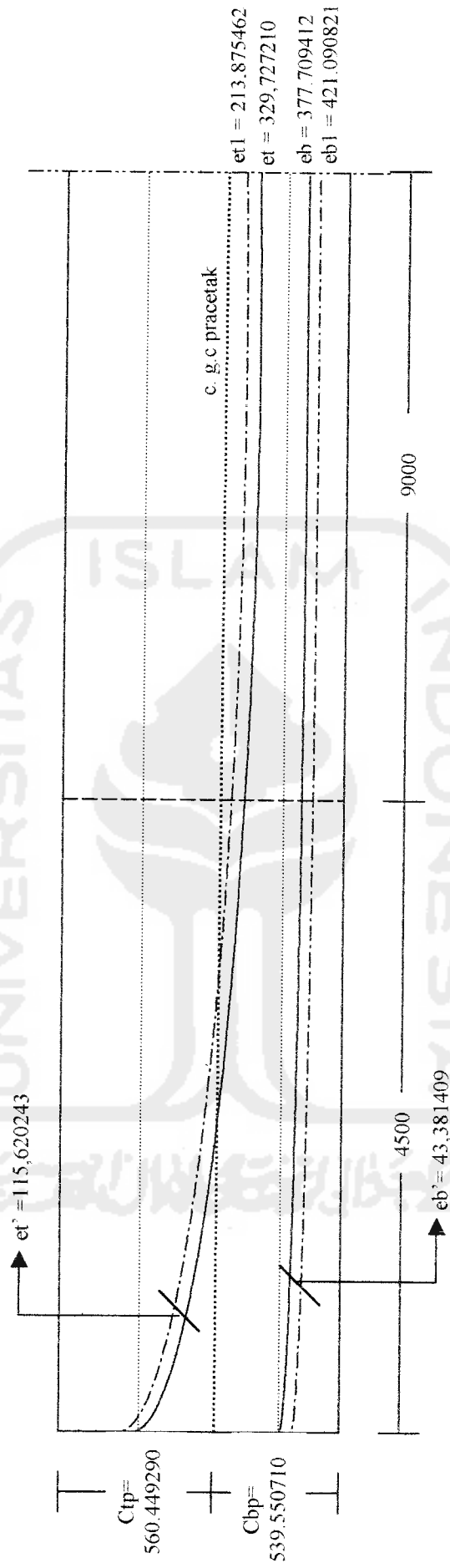
Dari hasil perhitungan di atas, dapat digambarkan daerah aman letak tendon seperti terlihat pada gambar 4.5 berikut ini.



Gambar 4.5 Letak aman tendon balok pratekan pracetak I Bebas pasca tarik komposisi kondisi grouting

Penggambaran daerah batas letak aman tendon

Dari hasil perhitungan di atas, dapat digambarkan daerah aman letak batas tendon seperti terlihat pada gambar 4.6 berikut ini.



Gambar 4.6 Letak aman tendon balok pratekan pracetak I Bebas pasca tarik komposisi kondisi ungrouting

4.3 Perhitungan dengan Cara Program

Dari hasil program yang didapat baik pada perhitungan balok pracetak pratekan komposit dengan pelat cor ditempat tanpa dukungan sementara sistem penarikan pratarik ataupun pascatarik menunjukkan hasil yang hampir mendekati perhitungan manual. Hasil program ini ditampilkan pada *form* hasil masing-masing sistem penarikan yang dapat dilihat pada gambar 3.6 dan 3.10.

Dalam mengoperasikan program dari memasukkan data masukan (*input*) sehingga diperoleh hasil (*output*) program, diperlukan waktu kurang lebih 45 detik. Waktu tersebut sangat singkat bila dibandingkan dengan waktu yang diperlukan untuk menghitung dengan cara perhitungan manual.

Mengacu pada hasil dari contoh perhitungan yang telah didapat (tabel 4.12, 4.13, 4.14) menunjukkan persentasi kesalahan relatif yang kecil, dapat dikatakan mendekati nol. Ini menunjukkan tidak terdapat kesalahan logika (*logic error*) pada program, kesalahan relatif yang kecil tersebut terjadi dikarenakan perbedaan ketelitian akibat pembulatan yang dilakukan pada perhitungan manual. Maka dapat dikatakan bahwa program ini sudah cukup valid.

4.4 Perbandingan Hitungan Manual dengan Perhitungan Program

Berdasarkan hasil hitungan manual dan hitungan program, dilakukan perbandingan hasil untuk melihat kesalahan relatif yang terjadi.

4.4.1 Hitungan Kesalahan Relatif antara Perhitungan Manual dan Perhitungan Program V.B. 6.0 dengan menggunakan Program Excel pada Sistem Pratarik

Tabel 4.12 Perbandingan perhitungan manual dengan perhitungan program V.B. 6.0 pada balok pracetak pratekan I Standar AASHTO tipe IV komposit sistem pratarik

Menentukan	Perhitungan manual	Perhitungan program	kesalahan relatif (%)
A_c (mm^2)	902910.8186	902910.818873	3.02355E-08
C_{tc} (mm)	571.6684836	571.6684593	4.25072E-06
C_{bc} (mm)	999.3315164	999.3315406	2.42162E-06
S_{tc} (mm^3)	479424532.623	479424532.67078	9.96611E-09
S_{bc} (mm^3)	274255212.31	274255212.398225	3.21689E-08
I_c (mm^4)	274071883947.871	274071883947.868	1.09122E-12
K_t (mm)	363.0686514	363.06862686	6.75905E-06
K_b (mm)	311.8676214	311.86763965	5.85184E-06
f_{tT} (N/mm^2)	-2.314307573	-2.3143064075	5.03606E-05
f_{bT} (N/mm^2)	-22.25798871	-22.257990865	0.000009682
f_{tL} (N/mm^2)	-8.2843512	-8.2843443860	8.22515E-05

Menentukan	Perhitungan manual	Perhitungan program	kesalahan relatif (%)
f_bL (N/mm ²)	-11.06838165	-11.0683831258	1.33335E-05
$f_t c$ (N/mm ²)	-11.43812684	-11.4381254234	1.23849E-05
$f_b c$ (N/mm ²)	-5.555268702	-5.55527004127	2.41081E-05
Mn (KNm)	10299.46491	10299.4649070	2.91277E-08
et (mm), tumpuan	-363.0686514	-363.068626860	6.75905E-06
eb (mm), tumpuan	-311.8676214	-311.867639652	5.85248E-06
etl (mm), tumpuan	-473.5897023	-473.593028986	0.000702436
eb1 (mm), tumpuan	381.2856849	381.268176667	0.004592104
et (mm), 1/4 bentang	116.721566	116.721584927	1.62155E-05
eb (mm), 1/4 bentang	407.0939066	407.093924917	4.49945E-06
etl (mm), 1/4 bentang	6.2005151	6.19718280149	0.053771183
eb1 (mm), 1/4 bentang	476.5119701	476.494461932	0.00367437
et (mm), 1/2 bentang	276.6516385	276.651655522	6.15286E-06
eb (mm), 1/2 bentang	438.8360017	438.836020006	4.17149E-06
etl (mm), 1/2 bentang	166.1305871	166.127253397	0.002006716
eb1 (mm), 1/2 bentang	508.2540652	508.2365570213	0.003444888
w	0.05420137587	0.0541908487	0.019426103

4.4.2 Hitungan Kesalahan Relatif antara Perhitungan Manual dan Perhitungan Program V.B. 6.0 dengan menggunakan Program Excel pada Sistem Pascatarik Kondisi Grouting

Tabel 4.13 Perbandingan perhitungan manual dengan perhitungan program V.B. 6.0 pada balok pracetak pratekan I Bebas komposit sistem pascatarik kondisi grouting

Menentukan	Perhitungan manual	Perhitungan program	kesalahan relatif (%)
A_c (mm ²)	890637.7907	890637.79116853	5.26061E-08
C_{tc} (mm)	429.849204	429.849204221685	5.15727E-08
C_{bc} (mm)	870.150796	870.150795778	2.55128E-08
S_{tc} (mm ³)	395047184	395047183.905055	2.40338E-08
S_{bc} (mm ³)	195150907.6	195150907.695504	4.89385E-08
I_c (mm ⁴)	169810717600	169810717631.591	1.86037E-08
K_t (mm)	290.134264	290.940902	0.278022316
K_b (mm)	260.134264	260.134263521263	1.84035E-07
f_{tT} (N/mm ²)	-1.156337	-1.15633709729866	8.41439E-06
f_{bT} (N/mm ²)	-16.504925	-16.504924965	2.12058E-07
f_{tL} (N/mm ²)	-6.640959	-6.64185071559309	0.01342571
f_{bL} (N/mm ²)	-8.444061	-8.44326418606959	0.009436383
f_{tc} (N/mm ²)	-9.306463	-9.3037545581128	0.029102806
f_{bc} (N/mm ²)	-3.048237	-3.047439936963	0.026148329
M_n (KNm)	3124.407282	3124.40728335299	4.33039E-08

Menentukan	Perhitungan manual	Perhitungan program	kesalahan relatif (%)
et (mm), tumpuan	-290.940902	-290.940902089	3.05904E-08
eb (mm), tumpuan	260.134264	260.1342635	1.92208E-07
etl (mm), tumpuan	-419.461528	-419.4615289299	2.21689E-07
eb1 (mm), tumpuan	304.830477	304.830475763553	4.05618E-07
et (mm), 1/4 bentang	166.175168	166.175171854	2.31924E-06
eb (mm), 1/4 bentang	343.837685	343.83768412	2.55935E-07
etl (mm), 1/4 bentang	37.654542	37.6545450144334	8.0055E-06
eb1 (mm), 1/4 bentang	388.533898	388.533896371	4.19268E-07
et (mm), 1/2 bentang	318.547191	318.5471965030	1.72753E-06
eb (mm), 1/2 bentang	371.738825	371.738824332	1.79696E-07
etl (mm), 1/2 bentang	190.026565	190.026569662569	2.45364E-06
eb1 (mm), 1/2 bentang	416.435038	416.435036574363	3.42343E-07
w	0.03128	0.0312960235640648	0.051226228

4.4.3 Hitungan Kesalahan Relatif antara Perhitungan Manual dan Perhitungan Program V.B. 6.0 dengan menggunakan Program Excel pada Sistem Pascatarik Kondisi Ungrouting

Tabel 4.14 Perbandingan perhitungan manual dengan perhitungan program V.B. 6.0 pada balok pracetak pratekan I Bebas komposit sistem pascatarik kondisi ungrouting

Menentukan	Perhitungan manual	Perhitungan program	kesalahan relatif (%)
A_c (mm ²)	866276.0656	866276.06604418	5.12746E-08
C_{tc} (mm)	410.440537	410.440536892444	2.6205E-08
C_{bc} (mm)	889.559463	889.559463107556	1.20909E-08
S_{tc} (mm ³)	381840821	381840821.743076	1.94604E-07
S_{bc} (mm ³)	176180411	176180411.072454	4.11249E-08
I_c (mm ⁴)	156722951800	156722951883.680	5.33936E-08
K_t (mm)	277.952380	277.952379746183	9.13167E-08
K_b (mm)	267.587824	267.587820185697	1.42544E-06
f_{tT} (N/mm ²)	-0.66596	-0.665966788139386	0.001019291
f_{bT} (N/mm ²)	-18.620216	-18.6202157595638	1.29126E-06
f_{tL} (N/mm ²)	-6.402515	-6.40251522122548	3.45529E-06
f_{bL} (N/mm ²)	-9.630531	-9.63052959837946	1.45539E-05
f_{tc} (N/mm ²)	-9.160209	-9.16020883652497	1.78462E-06
f_{bc} (N/mm ²)	-3.653703	-3.65370167755597	3.61946E-05
M_n (KNm)	3116.041221	3116.0412395953	5.9676E-07

Menentukan	Perhitungan manual	Perhitungan program	kesalahan relatif (%)
et (mm), tumpuan	-277.807312	-277.952379746183	0.052191583
eb (mm), tumpuan	267.587824	267.5878201857	1.42544E-06
etl (mm), tumpuan	-393.804128	-393.804128466206	1.18385E-07
eb1 (mm), tumpuan	310.969233	310.969228466437	1.45788E-06
et (mm), 1/4 bentang	177.807312	177.807319453428	4.19186E-06
eb (mm), 1/4 bentang	350.179015	350.179013512774	4.24704E-07
etl (mm), 1/4 bentang	61.955564	61.9555707334059	1.08681E-05
eb1 (mm), 1/4 bentang	393.560424	393.560421793514	5.60647E-07
et (mm), 1/2 bentang	329.727210	329.727219186632	2.78613E-06
eb (mm), 1/2 bentang	377.709412	377.709411288467	1.88381E-07
etl (mm), 1/2 bentang	213.875462	213.87547046661	3.95866E-06
eb1 (mm), 1/2 bentang	421.090821	421.090819569207	3.39783E-07
w	0.03128	0.0312960235640648	0.051226228