

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Struktur beton prategang didesain berdasarkan konsep persamaan keseimbangan tegangan yang terjadi pada struktur. Dengan memanfaatkan kemampuan beton untuk menahan gaya tekan yang cukup besar, gaya prategang dapat diberikan pada struktur melalui plat anker dengan menggunakan tendon prategang .

Beton Prategang adalah beton yang telah diberikan tegangan tekan dalam untuk mengurangi tegangan tarik potensial dalam beton akibat beban kerja. Beton prategang pada dasarnya adalah beton di mana tegangan-tegangan internal dengan besar serta distribusi yang sesuai diberikan sedemikian rupa sehingga tegangan-tegangan yang diakibatkan oleh beban-beban luar dilawan sampai suatu tingkat yang diinginkan. Prategang meliputi tambahan gaya tekan pada struktur untuk mengurangi atau bahkan menghilangkan gaya tarik internal dan dalam hal ini retak pada beton dapat dihilangkan. Pada beton prategang, prategang pada umumnya diberikan dengan menarik baja tulangan. Gaya tekan disebabkan oleh reaksi baja tulangan yang ditarik, mengakibatkan berkurangnya retak, elemen beton prategang akan jauh lebih kokoh dari elemen beton prategang biasa. Prategang juga menyebabkan gaya dalam yang berlawanan dengan gaya luar dan mengurangi atau bahkan menghilangkan lendutan secara signifikan pada struktur (Jeremy Maruli Sitorus, 2019).

Salah satu faktor yang mempengaruhi dalam penggunaan beton prategang ialah pemilihan bentuk penampang yang terbaik untuk beton prategang akibat lenturan. Bentuk yang sederhana adalah bentuk persegi panjang yang dimiliki oleh semua pelat pejal dan digunakan dalam untuk beberapa balok bentang pendek. Sejauh ini pemikiran mengenai acuan (cetakan, bekisting), penampang persegi panjang adalah yang paling ekonomis tetapi jarak kern kecil dan lengan momen yang tersedia untuk baja terbatas. Beton dekat sumbu yang melalui titik berat dan pada sisi tarik tidak efektif dalam menahan momen, terutama pada tahap

batas. Sehingga bentuk-bentuk lain seringkali digunakan untuk beton prategang seperti penampang I dan penampang T.

Pemberian gaya prategang pada beton akan memberikan tegangan tekan pada penampang. tegangan ini akan menahan beban luar yang bekerja pada penampang. Pemberian gaya prategang dapat dilakukan sebelum atau sesudah beton dicor. Pemberian gaya prategang yang dilakukan sebelum pengecoran disebut sistem pratarik (*pretension*), sedangkan pemberian gaya prategang yang dilakukan sesudah pengecoran disebut sistem pascatarik (*posttension*).

Oleh Karena itu, struktur beton prategang pada kondisi-kondisi tertentu menjadi alternatif yang menguntungkan dibanding jenis struktur beton lainnya, karena mempunyai beberapa kelebihan. Tuntutan untuk kebutuhan dan penggunaan ruang secara efektif, kontrol lendutan maupun retak yang baik, merupakan kelebihan jenis struktur ini. Selain itu kelebihan lainnya ialah : jenis struktur ini dapat dilaksanakan disaat jenis yang lain sudah tidak dapat digunakan karena alasan teknis maupun ekonomis. Dengan memperhatikan hal - hal tersebut, maka beton prategang merupakan satu alternatif yang menarik untuk dikaji tentang kapasitasnya, sehingga memberikan hasil yang bermanfaat dari studi lebih lanjut tentang struktur jenis ini.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana cara menganalisa gaya prategang dari setiap bentuk profil. Jika ditinjau dari bentuk profil yang berbeda, tetapi mutu bahan, jarak eksentrisitas, luas penampang, dan beban luar yang sama melalui metode perhitungan beban kombinasi.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah:

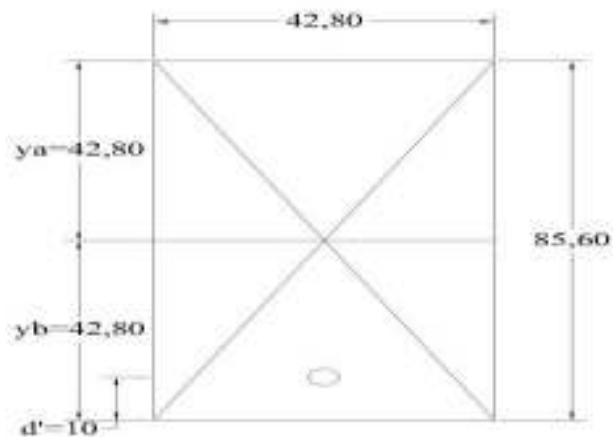
1. Untuk mengetahui tegangan yang terjadi sepanjang bentang pada kelima bentuk penampang.

2. Untuk mengetahui lendutan akibat bentuk jalur kabel lurus eksentris pada kelima bentuk penampang

1.4 Batasan Masalah

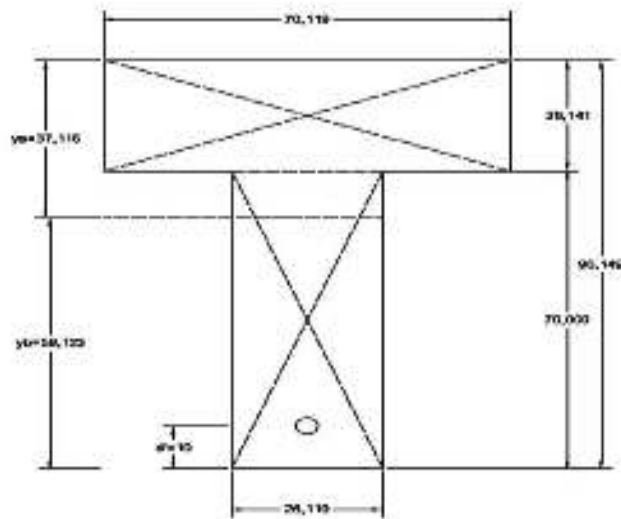
Dalam analisa ini, penulis membatasi permasalahan untuk penyederhanaan sehingga tujuan dari penulisan tugas akhir ini dapat dicapai, adapun pembatasan masalahnya sebagai berikut :

1. Dalam studi literatur ini, penulis membuat lima bentuk profil beton prategang, yaitu



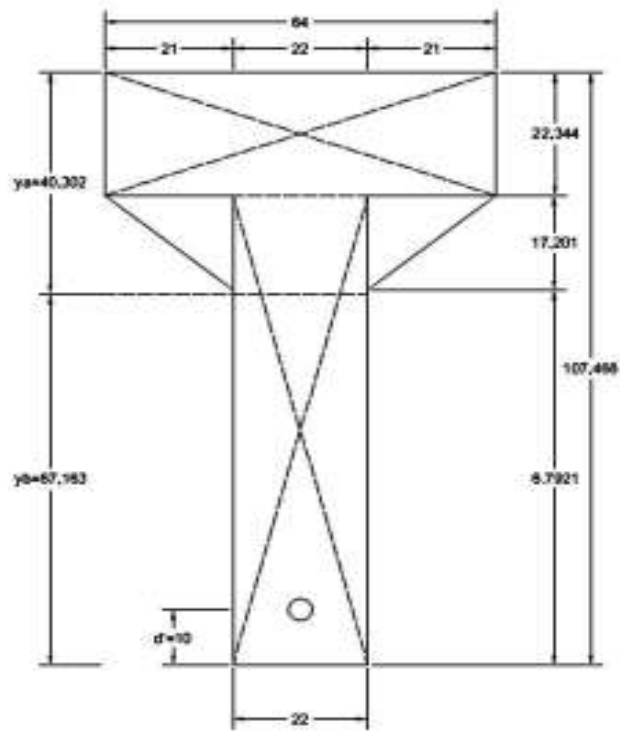
Gambar 1. 1 Bentuk Penampang Persegi

Sumber :hasil penelitian (2022)



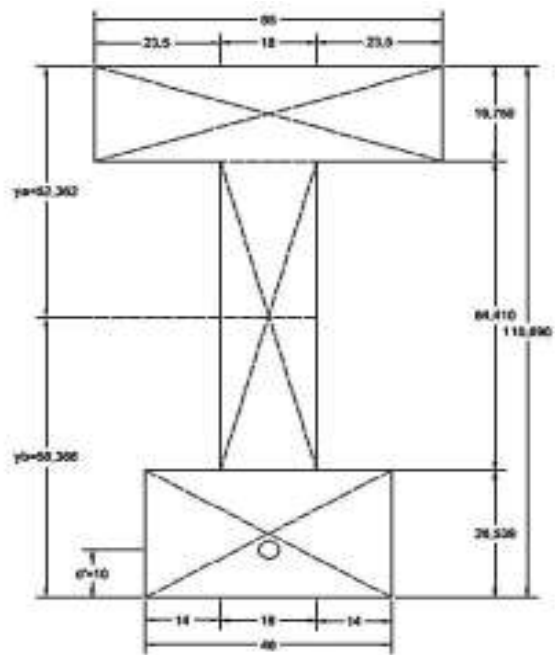
Gambar 1. 2 penampang bentuk T

Sumber :hasil penelitian (2022)



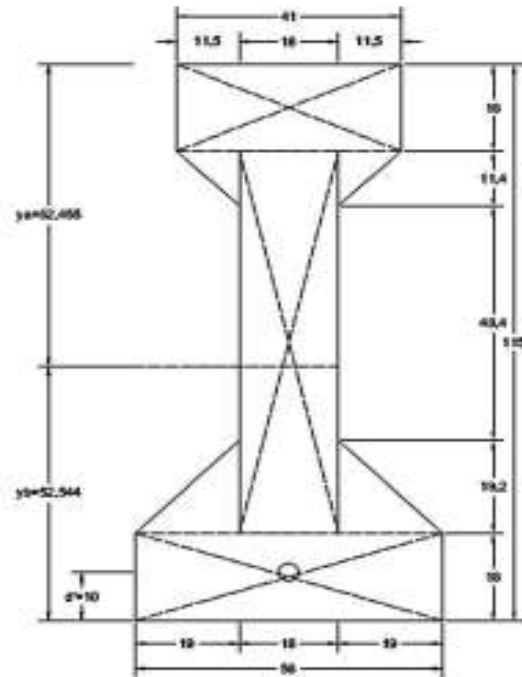
Gambar 1. 3 Penampang Bentuk Y

Sumber :hasil penelitian (2022)



Gambar 1. 4 Penampang Bentuk I

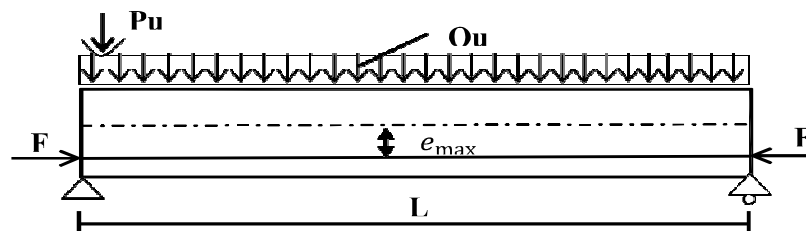
Sumber :hasil penelitian (2022)



Gambar 1. 5 Penampang Bentuk I Tidak Simetris

Sumber :hasil penelitian (2022)

2. Data-data persamaan dari keempat bentuk profil yaitu:
 - A. Kuat tekan beton $f'c = 40$ MPa
 - B. Kuat tekan awal beton $(f'ci) = (85\% f'c) = 34$ Mpa
 - C. Panjang bentang yang direncanakan adalah $L = 17,1205$ m
 - D. Berat isi beton adalah $= 2,4$ T/m³
 - E. Beban terpusat $P = 10$ Ton
 - F. Beban hidup adalah $q_l = 450$ kg/m³
 - G. Jarak tendon keserat terluar adalah $d' = 10$ cm



Gambar 1. 6 bentang balok jalur Kabel Lurus Dengan Eksentrisitas

Sumber :hasil penelitian (2022)

- H. Analisa perhitungan dengan metode kombinasi beban dihitung manual untuk mencari nilai tegangan yang terjadi.
- I. Gambar diagram interaksi hanya meliputi antara tegangan yang terjadi pada serat atas ($f'a$) dan serat bawah ($f'b$).

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian tersebut adalah untuk menambah wawasan dan pengetahuan penulis melalui teori beton pratekan dari perkuliahan dalam memahami perhitungan struktur beton prategang dan menganalisa perbandingan keempat bentuk profil untuk dapat menentukan nilai tegangan yang terjadi pada serat atas ($f'a$) dan serat bawah ($f'b$).

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan Tugas Akhir ini meliputi :

BAB I : PENDAHULUAN

Terdiri dari latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, maksud penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Membahas tentang teori dasar dari beberapa referensi yang mendukung serta mempunyai relevansi dengan penelitian ini.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Berisikan metoda penelitian.

BAB IV : ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Berisikan uraian analisis dan pembahasan terhadap hasil yang diperoleh.

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Berisikan tentang kesimpulan dan saran dari hasil analisis yang di lakukan.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Defenisi Beton Prategang

Beton adalah suatu bahan yang mempunyai kekuatan tekan yang tinggi, tetapi sebaliknya mempunyai kekuatan relatif sangat rendah terhadap tarik. Dengan menggunakan kombinasi beton dengan baja sebagai bahan struktur, maka tegangan-tegangan tarik dipikulkan kepada baja (Subiyanto, 1987).

a. Beton bertulang :

Cara bekerja beton bertulang adalah mengkombinasikan antara beton dan baja tulangan dengan membiarkan kedua material tersebut bekerja sendiri-sendiri, dimana beton bekerja memikul tegangan tekan dan baja penulangan memikul tegangan tarik. Jadi dengan menempatkan penulangan pada tempat yang tepat, beton bertulang dapat sekaligus memikul baik tegangan tekan maupun tegangan tarik (Ir. Soetoyo, 2015).

b. Beton pratekan :

Pada beton pratekan, kombinasi antara beton dengan mutu yang tinggi dan baja bermutu tinggi dikombinasikan dengan cara aktif, sedangkan beton bertulang kombinasinya secara pasif. Cara aktif ini dapat dicapai dengan cara menarik baja dengan menahannya kebeton, sehingga beton dalam keadaan tertekan. Karena penampang beton sebelum beban bekerja telah dalam kondisi tertekan, maka bila beban bekerja tegangan tarik yang terjadi dapat dieliminir oleh tegangan tekan yang telah diberikan pada penampang sebelum beban bekerja (Ir. Soetoyo, 2015).

2.2 Bentuk-bentuk penampang Beton

Penampang-I mempunyai beton yang dikonsentrasikan dekat serat terluar dimana dapat lebih efektif memberikan gaya tekan, baik pada saat peralihan maupun pada beban kerja dan beban batas. makin banyak beton dipusatkan (dikonsentrasikan) dekat dengan serat terluar, makin besar jarak kern dan makin besar lengan momen yang diberikan untuk kopel penahan dalam. Akan tetapi, prinsip pemusatan beton pada serat terluar tidak dapat dipakai terlalu jauh karena lebar dan tebal flens ditentukan oleh pertimbangan praktis, dan web (badan balok

yang berpenampang-I) harus mempunyai tebal minimum untuk memikul geser, untuk mencegah tekuk dan kemungkinan pengecoran beton dengan lebuah mudah.

Jika perbandingan M_G / M_T cukup besar, ada sedikit berbahaya flens tertegang berlebihan disaat peralihan, dan beton pada flens bawah akan turut mengecil. Hal ini akan mengakibatkan penampang-I tidak simetris dapat dianggap sebagai penampang -T. penampang -I, sama seperti untuk beton bertulang, seringkali lebih ekonomis karena beton dikonsentrasikan pada flens atas dimana lebih efektif untuk menyuplai gaya tekan. Akan tetapi, tidak ekonomis untuk digunakan bila perbandingan M_G / M_T kecil karena pusat tekanan saat peralihan akan tata letak kern bawah. Maka tegangan tarik akan terjadi pada flens atas dan tegangan tekan yang tinggi pada flens bawah.

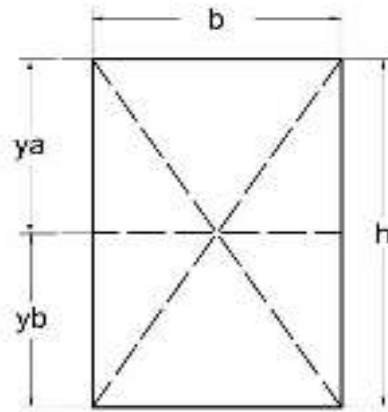
Penampang-I tidak simetris dengan flens bawah yang lebih besar, seperti penampang jalan kereta api, tidak ekonomis untuk memikul momen batas karena ada beton yang relatif kecil pada flens tekan. Akan tetapi ada sejumlah material untuk menahan gaya prategang awal. Untuk penampang-penampang komposit tertentu, itu dapat digunakan secara ekonomis dimana flens tarik dipracetak dan flens tekan dicor ditempat. Penampang ini membutuhkan momen gelagar yang sangat kecil untuk membawa pusat kedalam kern karenanya cocok bila perbandingan M_G / M_T kecil. Bila dibawa kebagian terluar penampang, ini menjadi penampang-T terbalik.

Penampang kotak (box) mempunyai sifat seperti penampang-I dalam menahan momen. Pengambilan satu penampang aatau yang lain tergantung dari persyaratan praktis tiap-tiap struktur.

Pembahasan diatas dapat diringkas sebagai berikut. Untuk penghematan baja dan beton, yang terbaik adalah menempatkan beton dekat serat serat terluar flens tekan. Bila perbandinagan M_G / M_T kecil, lebih banyak beton yang diperlukan dekat flens tarik. Bila perbandingan M_G / M_T besar, sedikit berbahaya jika memberikan tegangan- berlebih diasat peralihan, beton pada flens tarik hanya dibutuhkan untuk menempatkan tendon dengan baik (T. Y. Lin. 1982). Berikut ini adalah metode perhitungan momen Inersia pada penampang-yang berbeda beda.

1. Penampang bentuk persegi

Analisis penampang digunakan untuk mengetahui luasan, titik berat, momen inersia pada balok. Analisis penampang persegi adalah sebagai berikut :



Gambar 2. 1 penampang bentuk persegi

Sumber :hasil penelitian (2022)

Analisa perhitungan sebagai berikut :

Menghitung luas penampang balok :

$$A = b \times h \quad (2.1)$$

Menghitung titik berat penampang :

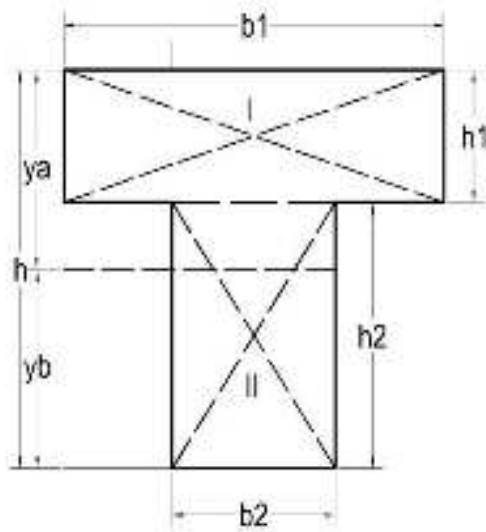
$$y = y_a = y_b = - h \quad (2.2)$$

Menghitung inersia :

$$I = \frac{1}{12} b \times h^3 \quad (2.1.3)$$

2. Penampang T

Analisis penampang T digunakan untuk mengetahui luasan, titik berat, momen inersia pada balok. Analisis penampang persegi adalah sebagai berikut :



Gambar 2. 2 Penampang Bentuk T
Sumber :hasil penelitian (2022)

Analisa perhitungan sebagai berikut :

Menghitung luas penampang balok :

(2.2.1a)

(2.2.1b)

(2.2.1c)

Menghitung titik berat pada penampang :

(2.2.2a)

—

(2.2.2b)

—

(2.2.2c)

—————

(2.2.2d)

—

(2.2.2e)

—

$$\text{-----} \quad (2.2.2f)$$

Uji kebenaran (2.2.2.g)

Menghitung inersia : (2.2.3a)

(2.2.3b)

(2.2.3c)

— { } (2.2.3d)

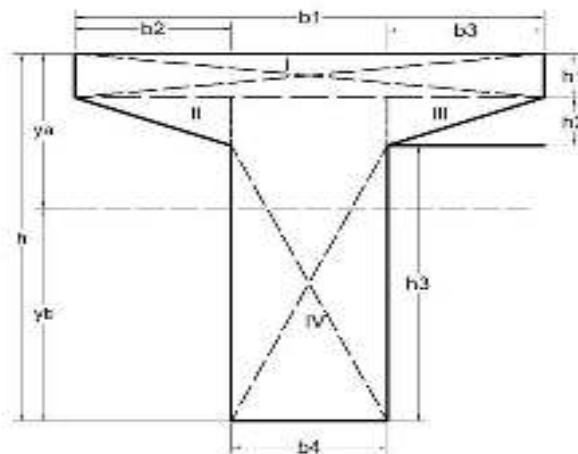
— { (—) } (2.2.3e)

— { (—) } (2.2.3f)

(2.2.3g)

3. penampang bentuk Y

Analisis penampang Y digunakan untuk mengetahui luasan, titik berat, momen inersia pada balok. Analisis penampang persegi adalah sebagai berikut :



Gambar 2. 3 penampang Bentuk Y

Sumber :hasil penelitian (2022)

Analisa perhitungan sebagai berikut :

Menghitung luas penampang balok :

(2.3.1a)

–

(2.3.1b)

–

(2.3.1c)

(2.3.1d)

(2.3.1e)

Menghitung titik berat penampang :

–

(2.3.2a)

–

(2.3.2b)

–

(2.3.2c)

–

(2.3.2d)

–

(2.3.2e)

–

(2.3.2f)

(2.3.2g)

(2.3.2h)

Uji kebenaran

(2.2.2i)

Menghitung inersia :

(2.3.3a)

(2.3.3b)

(2.3.3c)

(2.3.3d)

— { } (2.3.3e)

{— } { } (2.3.3f)

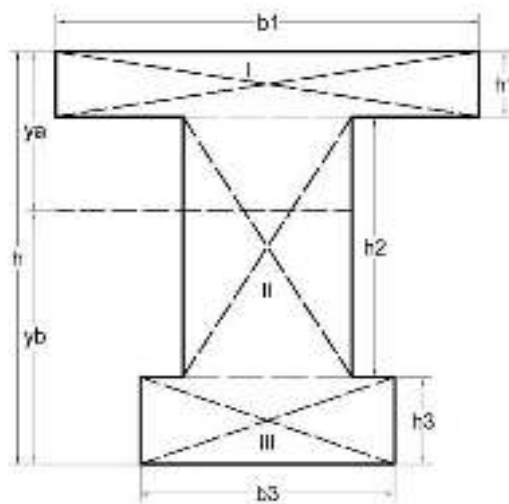
— { (-) } (2.3.3g)

— { (-) } (2.3.3h)

(2.3.3i)

4. Penampang bentuk I

Analisis penampang Y digunakan untuk mengetahui luasan, titik berat, momen inersia pada balok. Analisis penampang persegi adalah sebagai berikut :



Gambar 2. 4 Penampang Bentuk I

Sumber :hasil penelitian (2022)

Analisa perhitungan sebagai berikut :

Menghitung luas penampang balok :

(2.4.1a)

(2.4.2b)

(2.4.2c)

(2.4.2d)

Menghitung titik berat pada penampang :

—

(2.4.2a)

—

(2.4.2b)

—

(2.4.2c)

(2.4.2d)

—

(2.4.2e)

—

(2.4.2f)

—

(2.4.2g)

(2.4.2h)

Uji kebenaran

(2.4.2i)

Menghitung inersia :

(2.4.3a)

(2.4.3b)

(2.4.3c)

(2.4.3d)

— { } (2.4.3e)

— { (—) } (2.4.3f)

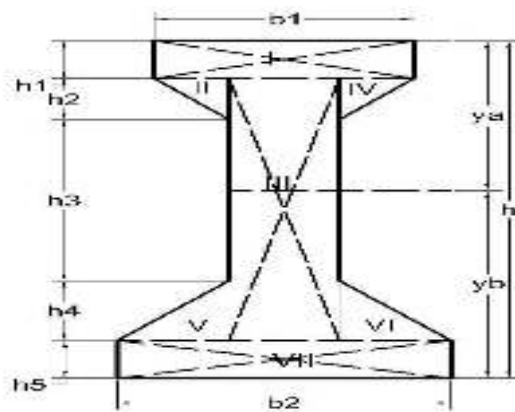
— { (—) } (2.4.3g)

— { } (2.4.3h)

(2.4.3i)

5. Penampang bentuk I tidak simetris

Analisis penampang Y digunakan untuk mengetahui luasan, titik berat, momen inersia dan modulus penampang pada balok. Analisis penampang persegi adalah sebagai berikut :



Gambar 2. 5 Penampang Bentuk I

Sumber :hasil penelitian (2022)

Analisa perhitungan sebagai berikut :

Menghitung luas penampang balok :

(2.5.1a)

- (2.5.1b)

(2.5.1c)

- (2.5.1d)

(2.5.1e)

(2.5.1f)

Menentukan jarak garis netral keserat terluar atas dan bawah :

- (2.5.2a)

- (2.5.2b)

- (2.5.2c)

- (2.5.2d)

- (2.5.2e)

- (2.5.2f)

- (2.5.2g)

- (2.5.2h)

- (2.5.2i)

- (2.5.2j)

Uji kebenaran

(2.5.2k)

Menghitung inersia :

(2.5.3a)

(2.5.3b)

(2.5.3c)

(2.5.3d)

(2.5.3e)

(2.5.3f)

— { } (2.5.3g)

{— } { } (2.5.3h)

— { (—) } (2.5.3i)

— { (—) } (2.5.3j)

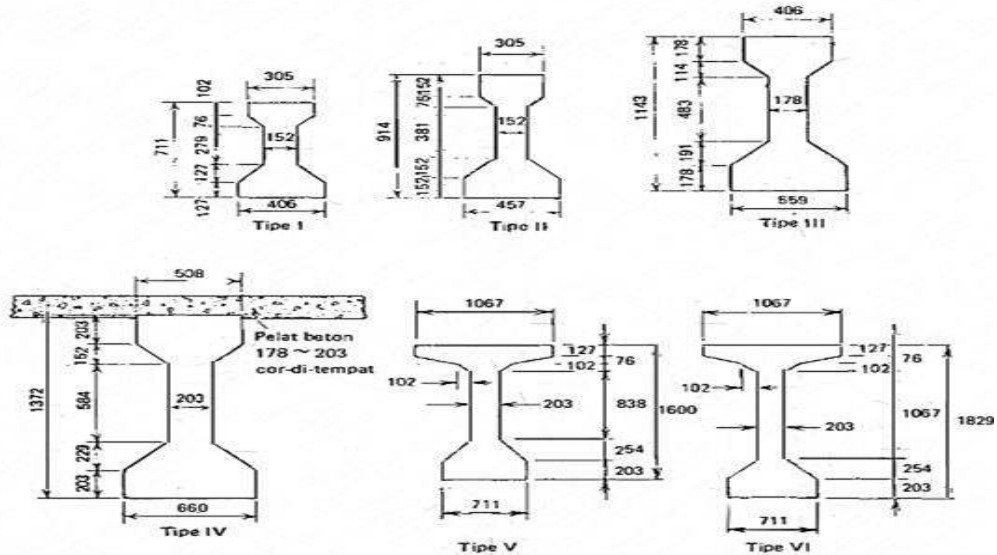
{— } { } (2.5.3k)

— { } (2.5.3l)

(2.5.3m)

2.3 Standar Desain

Standar AASHTO-PCI Untuk balok I beton prategang untuk jembatan – jembatan jalan raya digambarkan pada Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2. 6 Standart AASHTO-PCI Untuk Balok I

Sumber : T. Y. Lin.1982

2.4 Prinsip Dasar Beton Prategang

Beton pratekan dapat didefinisikan sebagai beton yang diberikan tegangan tekan internal sedemikian rupa sehingga dapat mengeliminir tegangan tarik yang terjadi akibat beban eksternal sampai suatu batas tertentu (Ir. Soetoyo, 2015). Ada 3 (tiga) konsep yang dapat dipergunakan untuk menjelaskan dan menganalisa sifat-sifat dasar dari beton pratekan atau prategang :

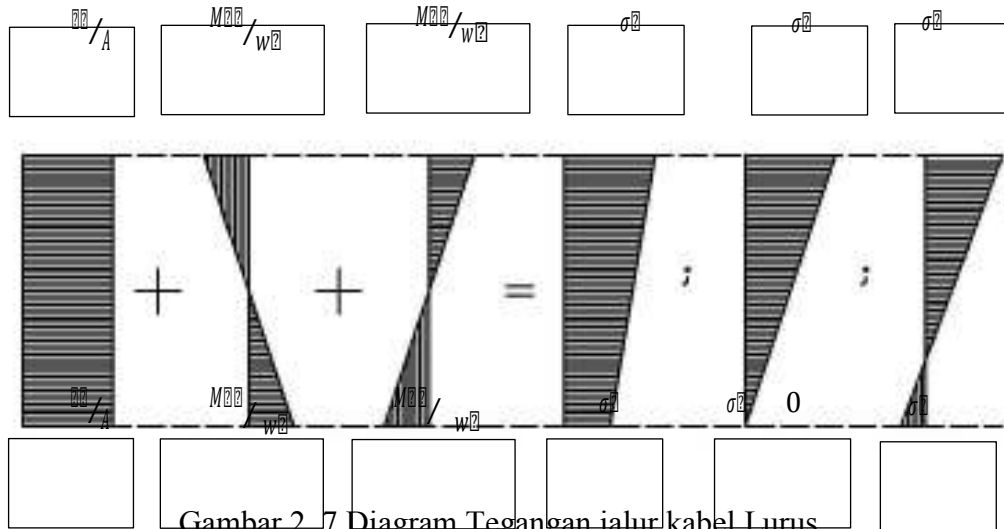
Konsep Pertama :

Sistem pratekan/prategang untuk mengubah beton yang getas menjadi bahan yang elastis.

Eugene Freyssinet menggambarkan dengan memberikan tekanan terlebih dahulu (pra-tekan) pada bahan beton yang pada dasarnya getas akan menjadi bahan yang elastis (Ir. Soetoyo, 2015).

Dengan memberikan tekanan (dengan menarik baja mutu tinggi), beton yang bersifat getas dan kuat memikul tekanan, akibat adanya tekanan internal ini dapat memikul tegangan tarik akibat beban eksternal.

Hal ini dapat dijelaskan dengan gambar dibawah ini :



Gambar 2.7 Diagram Tegangan jalur kabel Lurus

Sumber : (Subiyanto, 1987)

Akibat diberi gaya tekan (gaya prategang) F yang bekerja pada pusat berat penampang beton akan memberikan tegangan tekan yang merata diseluruh penampang beton sebaesar F/A , dimana A adalah luas penampang beton tsb.

Akibat beban merata (termasuk berat sendiri beton) akan memberikan tegangan tarik dibawah garis netral dan tegangan tekan diatas garis netral yang besarnya pada serat terluar penampang adalah :

Tegangan lentur : $f = \frac{M}{I} c$ /

Dimana :

M : momen lentur pada penampang yang ditinjau

c : jarak garis netral ke serat terluar penampang

I : momen inersia penampang.

Kalau kedua tegangan akibat gaya prategang dan tegangan akibat momen lentur ini dijumlahkan, maka tegangan maksimum pada serat terluar penampang adalah:

a. Tegangan serat atas :

$$f_{\text{Total}} = \frac{F}{A} - \frac{M_F}{A e} + \frac{M_n}{A e} \quad \text{-- tidak boleh melampaui tegangan ij}$$

b. Tegangan serat bawah :

$$f_{\text{Total}} = \frac{F}{A} + \frac{M_F}{A e} - \frac{M_n}{A e} \quad \text{-- tidak boleh lebih kecil dari nol.}$$

Dimana:

A = Luas penampang (cm²)

F = Gaya prategang (kg)

M_F = Momen akibat gaya prategang (kgcm)

M_n = Momen nominal (kgm)

w_a = Momen perlawanan pada serat atas

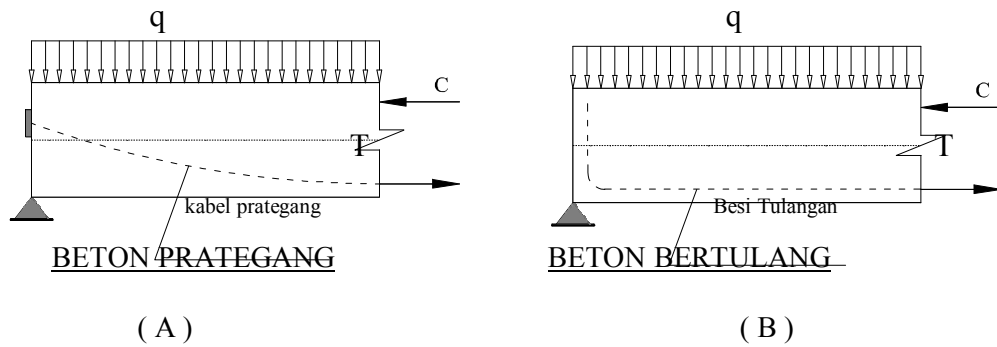
w_b = Momen perlawanan pada serat bawah

Jadi dengan adanya gaya internal tekan ini, maka beton akan dapat memikul beban tarik.

Konsep Kedua :

Sistem Prategang untuk Kombinasi Baja Mutu Tinggi dengan Beton Mutu Tinggi.

Konsep ini hampir sama dengan konsep beton bertulang biasa, yaitu beton prategang merupakan kombinasi kerja sama antara baja prategang dan beton, dimana beton menahan beban tekan dan baja prategang menahan beban tarik (Ir. Soetoyo, 2015). Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut :



(A) (B)
Gambar 2. 8 beton prategang/Beton Bertulang

Sumber : (Subiyanto, 1987)

Pada beton prategang, baja prategang ditarik dengan gaya prategang T yang mana membentuk suatu kopel momen dengan gaya tekan pada beton C untuk melawan momen akibat beban luar.

Sedangkan pada beton bertulang biasa, besi penulangan menahan gaya tarik T akibat beban luar, yang juga membentuk kopel momen dengan gaya tekan pada beton C untuk melawan momen luar akibat beban luar.

Konsep Ketiga :

Sistem Prategang untuk Mencapai Keseimbangan Beban.

Disini menggunakan prategang sebagai suatu usaha untuk membuat keseimbangan gaya-gaya pada suatu balok. Pada desain struktur beton prategang, pengaruh dari prategang dipandang sebagai keseimbangan berat sendiri, sehingga batang yang mengalami lendutan seperti plat, balok dan gelagar tidak akan mengalami tegangan lentur pada kondisi pembebanan yang terjadi (Ir. Soetoyo, 2015).

suatu balok beton diatas dua perletakan (*simple beam*) yang diberi gaya prategang F melalui suatu kabel prategang dengan lintasan parabola. Beban akibat gaya prategang yang terdistribusi secara merata kearah atas dinyatakan :

$$w_b = \quad /$$

Dimana :

w_b : beban merata kearah atas, akibat gaya prategang

F_h : tinggi parabola lintasan kabel prategang.

L : bentangan balok.

F : gaya prategang.

Jadi beban merata akibat beban (mengarah kebawah) diimbangi oleh gaya merata akibat prategang w_b yang mengarah keatas.

Inilah tiga konsep dari beton prategang (pratekan), yang nantinya dipergunakan untuk menganalisa suatu struktur beton prategang

2.5 TAHAP PEMBEBANAN

Tidak seperti pada perencanaan beton bertulang biasa. pada perencanaan beton pra- tegang ada dua tahap pembebanan yang harus dianalisa. Pada setiap tahap pembebanan harus selalu diadakan pengecekan atas kondisi pada bagian yang tertekan maupun bagian yang tertarik untuk setiap penampang.

Dua tahap pembebanan pada beton prategang adalah *Tahap Transfer* dan *Tahap Service (Layan)* (Ir. Soetoyo, 2015).

1. Tahap Transfer

Untuk metode pratarik, tahap transfer ini terjadi pada saat angker dilepas dan gaya prategang ditransfer ke beton. Untuk metode pascatarik, tahap transfer ini terjadi pada saat beton sudah cukup umur dan dilakukan penarikan kabel prategang.

Pada saat ini beban yang bekerja hanya berat sendiri struktur, beban pekerja dan peralatan, sedangkan beban hidup belum bekerja sepenuhnya, jadi beban yang bekerja sangat minimum, sementara gaya prategang yang bekerja adalah maksimum karena belum ada kehilangan gaya prategang.

Menghitung Tegangan sesaat transfer gaya prategang :

a. Tegangan tarik pada serat bawah balok :

$$f_b = - \frac{F}{A} - \frac{M}{I} y \quad (2.1.a)$$

b. Tegangan tekan pada serat atas balok :

$$f_a = \frac{1}{A} \left(F_i + \frac{M_F}{l} - \frac{M_{bs}}{l} + \frac{w_a}{2} - \frac{w_b}{2} \right) \quad (2.1.b)$$

Dimana :

- A = Luas penampang (cm²)
- F_i = Gaya prategang awal (kg)
- M_F = Momen akibat gaya prategang (kgcm)
- M_{bs} = Momen maksimum akibat beban mati (kgm)
- w_a = Momen perlawanan pada serat atas (cm³)
- w_b = Momen perlawanan pada serat bawah (cm³)

2. Tahap Serfis

Setelah beton prategang digunakan atau difungsikan sebagai komponen struktur, maka mulailah masuk ke tahap *service*, atau tahap layan dari beton prategang tersebut. Pada tahap ini beban luar seperti *live load*, angin, gempa dll. mulai bekerja, sedangkan pada tahap ini semua kehilangan gaya prategang sudah harus dipertimbangkan didalam analisa strukturnya.

Pada setiap tahap pembebanan pada beton prategang harus selalu dianalisis terhadap kekuatan, daya layan, lendutan terhadap lendutan ijin, nilai retak terhadap nilai batas yang diijinkan. Perhitungan untuk tegangan dapat dilakukan dengan pendekatan kombinasi pembebanan, konsep kopel internal (*internal couple concept*) atau metode beban penyeimbang (*load balancing method*), yang akan dibahas pada kuliah-kuliah berikutnya.

Menghitung Tegangan pada saat kondisi layan :

- a. Tegangan tarik pada serat bawah balok :

$$f_b = \frac{1}{A} \left(F_i + \frac{M_F}{l} - \frac{M_{bs}}{l} + \frac{w_a}{2} - \frac{w_b}{2} \right) \quad (2.2a)$$

- b. Tegangan tekan pada serat atas balok :

$$f_a = \frac{1}{A} \left(F_i + \frac{M_F}{l} - \frac{M_{bs}}{l} + \frac{w_a}{2} - \frac{w_b}{2} \right) \quad (2.2b)$$

Dimana :

A	=	Luas penampang (cm^2)
Fe	=	Gaya prategang efektif setelah semua kehilangan prategang diperhitungkan (kg)
MF	=	Momen akibat gaya prategang (kgcm)
Mn	=	Momen nominal (kgm)
wa	=	Momen perlawanan pada serat atas
wb	=	Momen perlawanan pada serat bawah

2.6 Karakteristik Bahan

2.6.1 Karakteristik Beton

a. Kekuatan Beton

Beton prategang memerlukan beton berkekuatan tekan tinggi pada usia yang muda, dengan kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton biasa. Susut yang rendah, karakteristik rangkai minimum dan nilai modulus Young yang tinggi pada umumnya dianggap perlu untuk beton yang dipakai untuk prategang. (N Krishna Raju, 1989).

Kekuatan dan daya tahan adalah dua kualitas utama paling penting di struktur beton prategang. Efek-efek jangka panjang dapat dengan cepat mengurangi gaya-gaya prategang dan dapat menyebabkan kegagalan yang tidak diharapkan. Dengan demikian, banyak upaya yang telah digunakan untuk menjamin ketatnya jaminan kualitas dan kontrol kualitas pada berbagai tahap produksi dan konstruksi serta perawatan (Edward G. Nawy, 2001).

Beton mutu tinggi memberikan ketahanan yang tinggi terhadap tarikan, geseran, retakan, dan kekuatan pada daerah ujung bentang. Hal ini merupakan tuntutan struktur beton prategang yang mengalami tegangan tinggi. Pada beton prategang pascatarik, saat pengangkutan akan lebih menguntungkan dengan menggunakan beton mutu tinggi, karena bila menggunakan beton mutu rendah akan mempersulit pelaksanaan pekerjaan karena akan memerlukan pengangkutan khusus. Faktor lain adalah beton mutu tinggi mempunyai modulus elastisitas yang tinggi dibandingkan beton mutu rendah, sehingga kehilangan gaya prategang akibat deformasi elastis dan rangkai beton akan

lebih kecil. Selain itu, beton mutu tinggi tersebut mempunyai kekuatan desak tinggi dan mempunyai kekuatan tarik yang tinggi pula dan mempunyai ketahanan ketahanan yang lebih besar terhadap retak lentur maupun retak diagonal.

Kekuatan tarik langsung (*direct tensile strength*) pada beton nilainya dapat berubah-ubah (*variable*), umumnya berkisar 0,06 sampai 0,10 , dan dapat menjadi nol jika retak-retak terjadi akibat susut atau faktor lainnya. Modulus keruntuhan beton diketahui lebih tinggi dibandingkan dengan kekuatan tarik langsung. Peraturan ACI mengusulkan $0,62\sqrt{\quad}$ sebagai estimasi besarnya modulus keruntuhan. Kekuatan geser langsung (*direct shearing strength*) jarang digunakan dalam desain, berkisar dari 0,50 sampai 0,70 . Gaya geser pada balok menghasilkan tegangan tarik utama, yang nilai batasnya biasa diukur berdasarkan kekuatan tarik langsung dari beton (T. Y. Lin dan Ned H. Burns, 1988).

Dalam prakteknya, diisyaratkan kekuatan beton yang lebih rendah pada saat transfer daripada kekuatan beton pada umur 28-hari. Hal ini dikehendaki untuk penarikan gaya prategang yang lebih dini ke beton. Saat transfer, beton belum dibebani oleh beban-beban eksternal yang berlebihan, dan kekuatan hanya perlu untuk menjaga keruntuhan pengangkuran dan rangkai yang berlebihan. Sehingga, faktor keamanan yang lebih kecil dianggap cukup. Gaya prategang boleh diberikan pada baja setelah mencapai kekuatan minimum 85% terhadap kekuatan desain beton.

b. Modulus Elastisitas Beton

Modulus elastisitas beton adalah gradien lurus pada bagian awal dari kurva tegangan-regangan, nilai ini lebih besar untuk beton dengan kekuatan tinggi. Modulus elastisitas beton merupakan fungsi dari beberapa variabel, termasuk tipe dan jumlah bahan yang digunakan baik dalam pembuatan maupun cara dan lamanya perawatan beton, umur pada saat pembebanan, laju pembebanan, dan faktor-faktor lain. Besarnya modulus elastisitas sangat penting bagi rancangan struktur beton prategang, sebab hal ini berkaitan dengan perilaku beton

prategang pada lendutan dan kehilangan gaya prategang (Amin Eko Legowo dan Muchamad Imron, 1996).

Modulus elastisitas beton E_c dalam SNI 03-2874-2002 ditetapkan:

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

Dimana :

E_c = Modulus elastisitas beton (MPa)

W_c = Berat volume beton (/)

f'_c = Tegangan tekan beton (MPa)

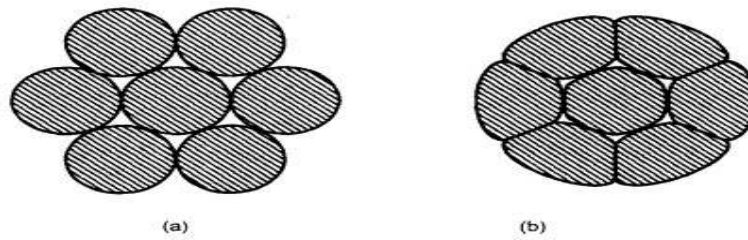
Sedangkan untuk beton normal diambil:

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (2.4)$$

2.6.2 Karakteristik Baja

Batang baja paduan berkekuatan tarik tinggi yang digunakan untuk pemberian prategang dapat berulir atau polos, dan tersedia dalam ukuran diameter nominal dari $\frac{3}{4}$ in. (19 mm) sampai 1,375 in. (35 mm). batang-batang tersebut harus memenuhi standar ASTM A 722. Selain ditarik dalam kondisi dingin dengan maksud meningkatkan kuat leleh, batang prategang juga dilepaskan tegangannya (*stress relieved*) untuk meningkatkan daktilitasnya. Pelepasan tegangan ini dilakukan dengan memanaskan batang tersebut hingga temperatur yang layak, biasanya dibawah 500°C. Meskipun proses pelepasan tegangan untuk batang dan *strand* pada dasarnya sama, kuat tarik batang prategang harus sedikitnya 150.000 psi (1034 MPa), dengan kuat leleh minimum sebesar 85% dari kuat ultimit untuk batang polos dan 80% untuk batang ulir (Edward G. Nawy, 2001).

Baja mutu-tinggi untuk sistem beton prategang biasanya merupakan salah satu dari ketiga bentuk kawat (*wire*), untaian kawat (*strand*), batang (*bar*). Untuk sistem pasca-tarik, banyak menggunakan kawat, yang digabungkan secara parallel menjadi kabel. *Strand* dibuat di pabrik dengan memuntir beberapa kawat bersama-sama, sehingga mengurangi jumlah satuan yang harus dikerjakan pada operasi penarikan. *Strand* juga sering digunakan untuk metode pasca-tarik.



Gambar 2. 9 *Strands* 7 kawat standar dan dipadatkan
 (a) Penampang standar (b) Penampang dipadatkan.

Sumber : Edward G. Nawy (2001)

Untaian kawat (*strand*) untuk sistem prategang umumnya disesuaikan dengan Spesifikasi ASTM A-416 yang mempunyai kekuatan batas 1720 MPa dan 1860 MPa (Tabel 2.1). Sejak tahun 1962, baja yang lebih kuat yang dikenal sebagai derajat 1860 MPa telah diproduksi oleh berbagai perusahaan. Untuk ukuran nominal yang sama, derajat 1860 MPa mempunyai luas baja yang lebih besar daripada ASTM A-416 derajat 1720 MPa dan 15% lebih kuat.

Modulus elastisitas, E_s , untuk tulangan prategang memiliki nilai tetap yang biasa digunakan untuk tujuan desain yaitu antara 197000 sampai 200000 MPa dan/atau untuk nilai yang lebih akurat berdasarkan hasil uji atau laporan pabrik mungkin diperlukan untuk memeriksa perpanjangan selama penarikan (SNI 2847:2019).

Tabel 2. 1 Sifat-sifat *Strand Stress-Relieved* Dengan Tujuh-Kawat Untaian Tanpa Lapisan (ASTM-416)

Diameter Nominal mm	Kekuatan Putus kN	Luas Nominal Strand mm ³	Beban Minimum pada Pemuaian 1% kN
<i>Derajat 1720 Mpa</i>			
6,35	40	23,22	34
7,94	64,5	37,42	54,7
9,53	89	51,61	75,6
11,11	120,1	69,68	10,3
12,7	160,1	92,9	136,2
15,24	240,2	139,35	204,2
<i>Derajat 1860 Mpa</i>			
9,53	102,3	54,84	87
11,11	137,9	74,19	117,2
12,7	183,7	98,71	156,1
15,24	260,7	140	221,5

Sumber : T. Y. Lin dan Ned H. Burns (1988)

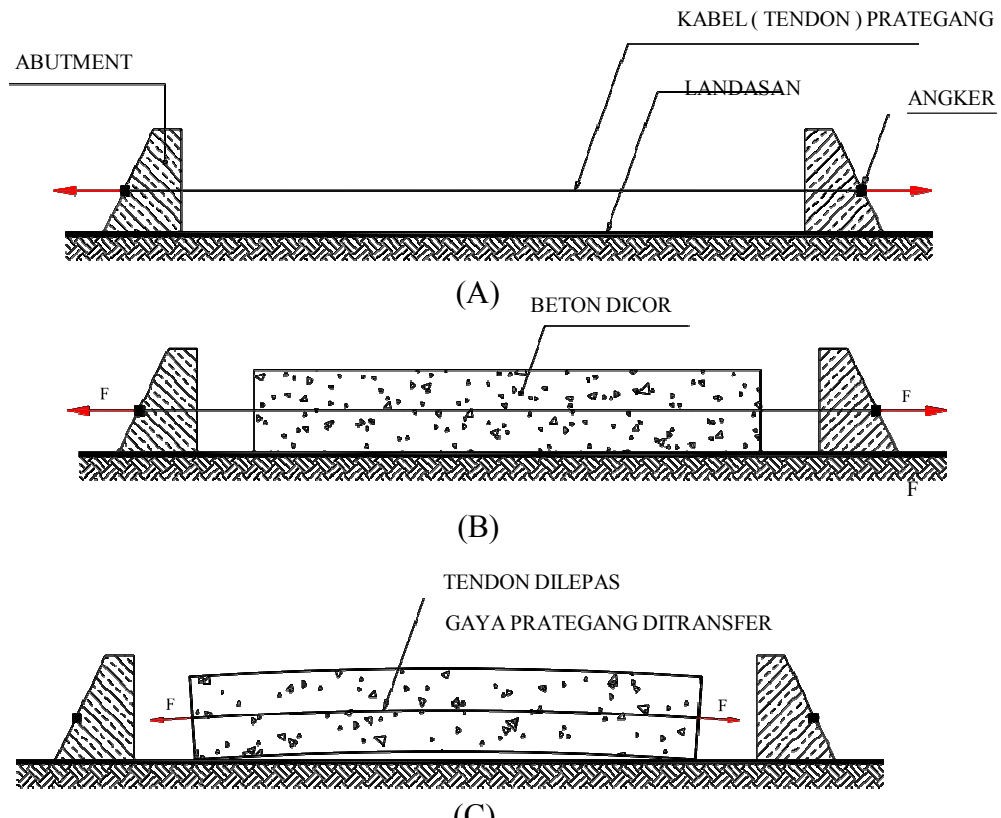
2.7 METODE PRATEGANGAN

Pada dasarnya ada 2 macam metode pemberian gaya prategang pada beton, yaitu:

1. Pratarik (*PreTension Method*)

Metode ini baja prategang diberi gaya prategang dulu sebelum beton dicor, oleh karena itu disebut pretension method (Ir. Soetoyo, 2015).

Adapun prinsip dari Pratarik ini secara singkat adalah sebagai berikut :



Gambar 2. 10 Pratarik (*PreTension method*)

Sumber :Ir.Soetoyo (2015)

Tahap 1 : Kabel (Tendon) prategang ditarik atau diberi gaya prategang kemudian diangker pada suatu abutment tetap (gambar 2.10 A).

Tahap 2 : Beton dicor pada cetakan (*formwork*) dan landasan yang sudah disediakan sedemikian sehingga melingkupi tendon yang sudah diberi gaya prategang dan dibiarkan mengering (gambar 2.10 B).

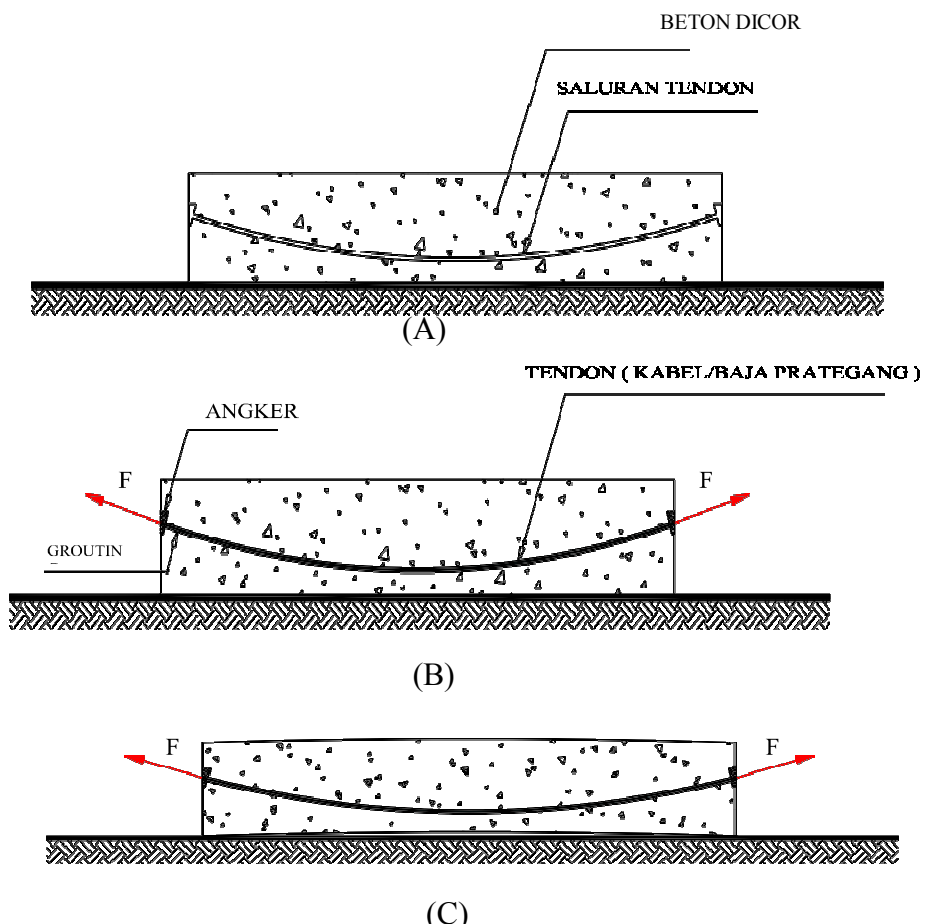
Tahap 3 : Setelah beton mengering dan cukup umur kuat untuk menerima gaya prategang, tendon dipotong dan dilepas, sehingga gaya prategang di- transfer ke beton (gambar 2.10C).

Setelah gaya prategang ditransfer kebeton, balok beton tsb. akan melengkung ke-atas sebelum menerima beban kerja. Setelah beban kerja bekerja, maka balok beton tersebut akan rata.

2. Pasca tarik (*Post-Tension Method*)

Pada metode Pascatarik, beton dicor lebih dahulu, dimana sebelumnya telah di-siapkan saluran kabel atau tendon yang disebut duct (Ir. Soetoyo, 2015).

Secara singkat metode ini dapat dijelaskan sebagai berikut :



(C)
Gambar 2. 11 Pasca tarik (*Post-Tension Method*)

Sumber :Ir.Soetoyo (2015)

Tahap 1 : Dengan cetakan (*formwork*) yang telah disediakan lengkap dengan saluran/selongsong kabel prategang (*tendon duct*) yang dipasang melengkung sesuai bidang momen balok, beton dicor (gambar 2.11 A).

Tahap 2 : Setelah beton cukup umur dan kuat memikul gaya prategang, tendon atau kabel prategang dimasukkan dalam selongsong (*tendon duct*), kemudian ditarik untuk mendapatkan gaya prategang. Metode pemberian gaya prategang ini, salah satu ujung kabel diangker, kemudian ujung lainnya ditarik (ditarik dari satu sisi). Ada pula yang ditarik di- kedua sisinya dan diangker secara bersamaan. Setelah diangkur, kemudian saluran di grouting melalui lubang yang telah disediakan.(Gambar 2.11 B).

Tahap 3 : Setelah diangkur, balok beton menjadi tertekan, jadi gaya prategang telah ditransfer kebeton. Karena tendon dipasang melengkung, maka akibat gaya prategang tendon memberikan beban merata kebalok yang arahnya keatas, akibatnya balok melengkung keatas (gambar 2.11 C).

Karena 30 *elativ* transportasi dari pabrik beton kesite, maka biasanya beton prate-gang dengan 30 *elativ post-tension ini* dilaksanakan secara segmental (balok dibagi-bagi, misalnya dengan panjang 1-1,5m), kemudian pemberian gaya prategang dilaksanakan disite, setelah balok segmental tersebut dirangkai.

2.8 PERENCANAAN BETON PRATEGANG

Ada 2 (dua) metode perencanaan beton prategang, yaitu :

a. *Working stress method* (metode beban kerja)

Prinsip perencanaan disini ialah dengan menghitung tegangan yang terjadi akibat pembebanan (*tanpa dikalikan dengan 30elati beban*) dan membandingkan dengan tegangan yang di-ijinkan. Tegangan yang di-ijinkan dikalikan dengan suatu 30elati kelebihan tegangan (*overstress*

factor) dan jika tegangan yang terjadi lebih kecil dari tegangan yang diijinkan tersebut, maka struktur dinyatakan aman.

b. *Limit state method* (metode beban batas)

Prinsip perencanaan disini didasarkan pada batas-batas tertentu yang dapat dilampaui oleh suatu sistim struktur. Batas-batas ini ditetapkan terutama terhadap kekuatan, kemampuan layan, keawetan, ketahanan terhadap beban, api, kelelahan dan persyaratan-persyaratan khusus yang berhubungan dengan penggunaan struktur tersebut.

Dalam menghitung beban rencana maka beban harus dikalikan dengan suatu selat beban (*load factor*), sedangkan kapasitas bahan dikalikan dengan suatu selat reduksi kekuatan (*reduction factor*).

Tahap batas (*limit state*) adalah suatu batas tidak diinginkan yang berhubungan dengan kemungkinan kegagalan struktur.

Kombinasi pembebanan untuk Tahap Batas Kekuatan (*Strength Limit State*) adalah :

Berdasarkan SNI 03-2874-2002

$$1. U = 1,4 D \quad (2.1)$$

$$2. U = 1,2 D + 1,6 L + 0,5 (A \text{ atau } R) \quad (2.2)$$

$$3. U = 1,2 D + 1,0 L \pm 1,6 W + 0,5 (A \text{ atau } R) \quad (2.3)$$

$$4. U = 0,9 D \pm 1,6 L \quad (2.4)$$

$$5. U = 1,2 D + 1,0 L \pm 1,0 E \quad (2.5)$$

$$6. U = 0,9 D \pm E \quad (2.6)$$

Dimana :

U = Kuat perlu

D = Dead Load (Beban Mati)

L = Live Load (Beban Hidup)

A = Beban Atap

R = Beban Air Hujan

W = Beban Angin

E = Beban Gempa

- Catatan :
- Jika ketahanan terhadap tekanan tanah H diperhitungkan didalam perencanaan, maka pada persamaan 5, 7 dan 9 ditambahkan 1,6 H, kecuali bila akibat tekanan tanah H akan mengurangi pengaruh beban W dan E, maka pengaruh tekanan tanah H tidak perlu diperhitungkan.
 - Jika ketahanan terhadap pembebanan akibat berat dan tekanan fluida F diperhitungkan dalam perencanaan, maka beban fluida 1,4 F harus ditambahkan pada persamaan 4, dan 1,2 F pada persamaan 5.
 - Untuk kombinasi beban ini selanjutnya dapat dipelajari dalam buku codebeton SNI 03 – 2874 – 2002

Perencanaan struktur untuk tahap batas kekuatan (*Strength Limit State*), menetapkan bahwa aksi design (R_u) harus lebih kecil dari kapasitas bahan dikalikan dengan suatu 32elati reduksi kekuatan ϕ .

$$R_u \leq \phi R_n$$

Dimana :

R_u = aksi desain

R_n = kapasitas bahan

ϕ = 32elati reduksi

Sehingga untuk aksi design, momen, geser, 32elati dan gaya aksial berlaku:

$$M_u \leq \phi M_n$$

$$V_u \leq \phi V_n$$

$$T_u \leq \phi T_n$$

$$P_u \leq \phi P_n$$

Harga-harga M_u , V_u , T_u dan P_u diperoleh dari kombinasi pembebanan yang paling maksimum, sedangkan M_n , V_n , T_n dan P_n adalah kapasitas penampang terhadap Momen, Geser, Puntir dan Gaya Aksial.

Karena kekuatan beton prategang sangat tergantung pada tingkat penegangan (besarnya gaya prategang) maka dikenal istilah : Prategang Penuh (*fully prestressed*) dan Prategang Sebagian (*partially prestressed*).

Untuk komponen-komponen struktur dari beton prategang penuh, maka komponen tersebut direncanakan untuk tidak mengalami retak pada beban layan, jadi pada komponen tersebut ditetapkan tegangan tarik yang terjadi = nol ($\sigma_{tt} = \sigma_{ts} = 0$).

Dimana :

σ_{ts} : tegangan tarik ijin pada saat servis

σ_{ts} : tegangan tarik ijin pada saat servis

Untuk komponen struktur yang direncanakan sebagai beton prategang sebagian, maka komponen tersebut dapat didesain untuk mengalami retak pada beban layan dengan batasan tegangan tarik pada saat layan diperbolehkan maksimum :

$$\sigma_{ts} = 0,50 \sqrt{f_c'}$$

Dimana :

f_c' : kuat tekan beton

Oleh karena itu konstruksi beton prategang harus didesain sedemikian sehingga mempunyai kekuatan yang cukup dan mempunyai kemampuan layan yang sesuai ke- butuhan. Disamping itu konstruksi harus awet, tahan terhadap api, tahan terhadap kelelahan (untuk beban yang berulang-ulang dan berubah-ubah), dan memenuhi persyaratan lain yang berhubungan dengan kegunaannya.

Perhitungan tegangan pada beton prategang harus memperhitungkan hal-hal sebagai berikut. :

- a. Kondisi pada saat transfer gaya prategang awal dengan beban terbatas (dead load dan beban konstruksi).
- b. Kehilangan gaya prategang. Untuk perhitungan awal kehilangan gaya prategang ini biasanya ditentukan 25 % untuk 34elati pratarik (*pre-tension*) dan 20 % untuk 34elatipascatarik (*post-tension*).
- c. Pada kondisi servis dengan gaya prategang efektif (sudah diperhitungkan kehilangan gaya prategangnya) dan beban maksimum (beban mati, beban hidup dan pengaruh-pengaruh lain).
- d. Perlu diperhitungkan pengaruh-pengaruh lain yang mempengaruhi struktur beton prategang seperti adanya pengaruh sekunder pada struktur statis tak tentu, pengaruh P delta pada gedung bertingkat tinggi, serta perilaku struktur dari awal sampai waktu yang ditentukan.

Tegangan-tegangan yang diijinkan beton untuk struktur lentur SNI 03 – 2874 – 2002

A. Tegangan sesaat setelah penyaluran gaya prategang dan sebelum terjadinya kehilangan gaya prategang sebagai fungsi waktu, tidak boleh melampaui :

- 1) Tegangan tekan serat terluar : $0,60 f'_{ci}$
- 2) Tegangan tarik serat terluar (kecuali item 1 dan 3) : $0,25\sqrt{f'_{ci}}$
- 3) Tegangan tarik serat terluar diujung struktur diatas tumpuan...:
 $0,50\sqrt{f'_{ci}}$

Apabila tegangan melampaui nilai-nilai tersebut diatas, maka harus dipasang tulangan extra (non prategang atau prategang) untuk memikul gaya tarik total beton yang dihitung berdasarkan asumsi penampang penuh sebelum retak.

B. Tegangan pada saat kondisi beban layan (sesudah memperhitungkan semua kehilangan gaya prategang yang mungkin terjadi), tidak boleh melampaui :

- 1) Tegangan tekan serat terluar akibat gaya prategang, beban mati dan beban hidup tetap : $0,45 f_c'$
- 2) Tegangan tekan serat terluar akibat gaya prategang, beban mati dan beban hidup total : $0,60 f_c'$
- 3) Tegangan tarik serat terluar dalam daerah tarik yang pada awalnya mengalami tekanan : $0,50\sqrt{\quad}$

Dari uraian-uraian diatas, pada prinsipnya konsep beton prategang dan beton bertulang biasa adalah sama, yaitu sama-sama dipasangnya tulangan pada daerah-daerah dimana akan terjadi tegangan tarik. Bedanya pada beton bertulang biasa, tulangan akan memikul tegangan tarik akibat beban, sedangkan pada beton prategang tulangan yang berupa kabel prategang (tendon) ditarik lebih dahulu sebelum bekerjanya beban luar. Penarikan kabel ini menyebabkan tertekannya beton, sehingga beton menjadi mampu menahan beban yang lebih tinggi sebelum retak.

Pada dasarnya elemen struktur beton prategang akan mengalami keretakan pada beban yang lebih tinggi dari beban yang dibutuhkan untuk meretakan elemen struktur dari beton bertulang biasa. Demikian pula dengan lendutan, untuk beton prategang lendutannya 35% lebih kecil dibandingkan dengan beton bertulang biasa, oleh karena itu konstruksi beton prategang itu banyak dipergunakan untuk bentangan-bentangan yang panjang.

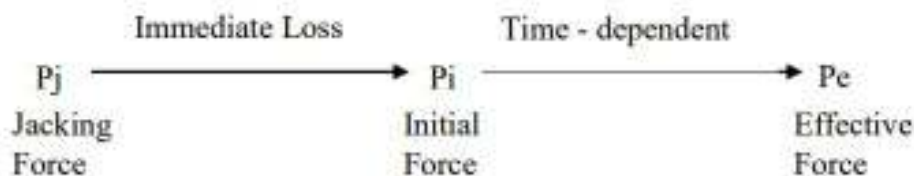
2.9 Kehilangan Prategang

Kehilangan gaya prategang adalah berkurangnya gaya yang bekerja pada tendon pada tahap-tahap pembebanan (Ir. Soetoyo, 2015). Pada perhitungan tegangan gaya prategang yang digunakan tidak konstan terhadap waktu. Selain itu, tegangan yang terjadi pada setiap tahapan pembebanan juga akan berubah-ubah dikarenakan kekuatan beton dan modulus elastisitas bertambah terhadap waktu.

Menurut T. Y. Lin, dalam menganalisis rancangan komponen struktur beton prategang harus mempertimbangkan gaya efektif dari tendon prategang yang bekerja pada setiap tahapan pembebanan struktur dan pemakaian sifat-sifat bahan yang berlaku pada peninjauan tegangan, dimana waktu merupakan variabel yang berpengaruh. Pemeriksaan kehilangan tegangan gaya prategang dapat dikelompokkan dalam dua katagori yaitu :

- a. Segera setelah transfer gaya prategang ke penampang beton. Pada tahap ini gaya pengangkutan prategang segera direduksi dengan kehilangan akibat gesekan (*friction*), slip pada ankur dan deformasi elastis beton akibat tekanan ankur ke penampang. Pengecekan dilakukan terhadap gaya terbesar pada tendon yang bekerja pada beton yang mungkin jauh di bawah kekuatan pada umur 28 hari. Peraturan ACI (*American Concrete Institute*) memperkenankan tegangan ijin beton pada saat transfer gaya prategang sebesar .
- b. Saat beban layan, setelah semua kehilangan gaya prategang terjadi. Dalam jangka waktu lama, juga terjadi kehilangan gaya prategang secara berangsur-angsur yang diakibatkan oleh susut dan rangkai beton serta relaksasi baja. Setelah terjadi seluruh kehilangan gaya prategang, tegangan efektif pada baja () diasumsikan sebagai tegangan tendon. Kekuatan beton dianggap bertambah menjadi f'_c .

Di dalam suatu sistem struktur beton prategang selalu terdapat kehilangan prategang, baik akibat sistem penegangan maupun akibat pengaruh waktu. Kehilangan prategang dapat diilustrasikan seperti pada gambar 2.8.



Gambar 2.8. Proses kehilangan gaya prategang
Sumber:

Kehilangan prategang langsung atau kehilangan sesaat adalah dan kehilangan prategang akibat pengaruh waktu adalah . Kehilangan prategang langsung disebabkan oleh perpendekan elastis dari beton, gesekan sepanjang kelengkungan tendon pada struktur pasca tarik dan slip ankur. Sedangkan kehilangan prategang akibat pengaruh waktu disebabkan oleh perpendekan dari beton pada level baja akibat rangkai dan penyusutan beton serta relaksasi baja.

2.10 Lendutan Batang Beton Prategang

Pada umumnya batang beton struktural harus didesain agar mempunyai kekakuan yang cukup untuk membatasi lendutan yang dapat berpengaruh merugikan terhadap kekakuan atau kemampuan fungsi struktur pada beban kerja. Kontrol terhadap lendutan sangat penting karena alasan-alasan sebagai berikut:

2. Lendutan yang berlebihan pada batang struktural utama tidak mudah terlihat sehingga pada jangka waktu lama struktur menjadi tidak sesuai untuk pemakaian yang direncanakan.
3. Lendutan yang besar akibat pengaruh dinamis dan akibat pengaruh beban yang berubah-ubah dapat mengurangi kenyamanan pemakainya.
4. Lendutan yang berlebihan cenderung menyebabkan kerusakan pada permukaan, sekat dan struktur-struktur yang berkaitan.

2.10.1 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Lendutan

Menurut N Krishna Raju, lendutan batang beton prategang dipengaruhi oleh faktor-faktor berikut ini:

- 1) Beban terpasang dan berat sendiri
- 2) Besarnya gaya prategang
- 3) Profil kabel
- 4) Momen inersia potongan melintang
- 5) Modulus elastisitas beton
- 6) Susut, rangkai, dan relaksasi tegangan baja
- 7) Bentangan batang yang bersangkutan
- 8) Kondisi penjepitan

Dalam tahap pra-retakan, seluruh potongan melintang adalah efektif dan lendutan dalam tahap ini dihitung dengan memakai momen inersia dari penampang beton seluruhnya. Perhitungan lendutan jangka pendek atau lendutan seketika yang terjadi segera setelah transfer prategang dan pada pemberian beban mudah dilakukan dengan memakai teori Mohr. Sedangkan dalam tahap retakan, sebuah balok beton prategang berperilaku sama dengan sebuah balok beton bertulang dan perhitungan lendutan dalam tahap ini dilakukan dengan meninjau hubungan momen kelangkungan yang menyangkut sifat-sifat penampang balok yang retak.

Di dalam kedua kasus diatas, pengaruh rangkai dan susut beton adalah untuk memperbesar lendutan jangka panjang akibat retak terus-menerus, yang diperhitungkan dengan memakai metode-metode empiris yang mencakup pemakaian modulus elastisitas efektif (jangka panjang) atau dengan mengalikan lendutan jangka pendek dengan faktor yang sesuai (N Krishna Raju, 1989).

2.10.2 Pengaruh Profil Tendon Terhadap Lendutan

Hampir semua kasus balok prategang menempatkan tendon dengan eksentrisitas mengarah ke tepi bawah balok untuk melawan momen lentur yang melengkungkan balok akibat beban transversal. Sebagai akibatnya, balok beton akan melengkungkan ke atas (*camber*) pada waktu pemberian prategang. Oleh karena itu, momen lentur pada setiap penampang merupakan hasil perkalian gaya prategang dan eksentrisitas, maka profil tendon itu sendiri akan menunjukkan bentuk D.M.L. Berikut ini dijelaskan metode perhitungan lendutan balok dengan profil kabel yang berbeda-beda (N Krishna Raju, 1989).

5. Tendon Lurus

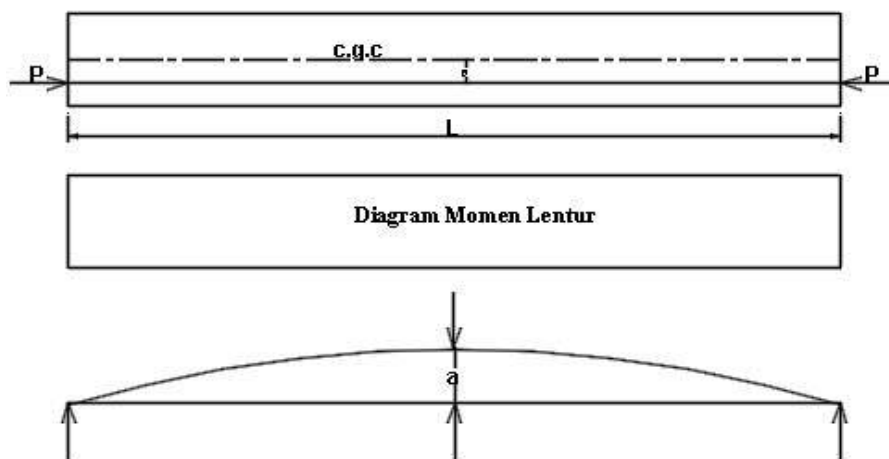
Profil atau jalur kabel lurus, menunjukkan sebuah balok dengan suatu tendon lurus dengan eksentrisitas yang konstan di bawah sumbu garis berat.

Lendutan ke atas dianggap negative.

(2.25)

—
= gaya prategang efektif (kN)

- e = eksentrisitas (mm)
- L = panjang balok (mm)
- = lendutan (mm)
- = modulus elastisitas beton (MPa)
- = inersia penampang (mm⁴)



Gambar 2.9 Balok yang melengkung ke atas dengan Tendon Lurus
 Sumber : N. Krishna Raju (1989)

2.11 Perbandingan studi literature dengan jurnal penelitian lainnya

Didalam Tugas Akhir ini, penulis menilai dan melakukan perbandingan antara studi literatur yang dibuat penulis dengan ketiga data penelitian sebelumnya.

1. Didalam jurnal Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret yang berjudul "*optimasi penampang persegi panjang pada elemen balok prategang (studi kasus pada Hotel Alila Surakarta*". (e-jurnal Matriks teknik Sipil/Maret 2018/85) oleh Dwieky Anugerah, Stefanus Kristiawan, Edy Purwanto .

Permasalahan yang dibahas pada penelitian ini adalah analisis untuk mengoptimasikan luas penampang balok tersebut agar lebih efisien. Dari proses optimasi tersebut akan diperoleh hubungan antara parameter A (Luas penampang), $f'c$ (Mutu beton), dan P (Gaya prategang). Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh dimensi

penampang baru dengan nilai $x_1 = 1$ m, dan $x_2 = 2,6$ m. hasil penelitian menunjukkan hubungan antara nilai A (Luas penampang) dengan $f'c$ (Mutu beton) dan nilai A (luas penampang) dengan nilai P (Gaya prategang). Berdasarkan hasil optimasi tersebut, apabila nilai $f'c$ semakin besar, maka nilai A akan semakin kecil. Begitu juga pola optimasi antara nilai A dan P, apabila nilai P semakin besar maka nilai A akan mengecil.

2. Di dalam jurnal Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Yogyakarta yang berjudul "*Pengaruh modifikasi penampang pada I-girder dan box girder beton prategang terhadap kekakuan dan lendutan*". (Volume 27, No.1, 2021, 97-106) oleh Hakas Prayuda, Taufiq Ilham Maulana, Arief Hidayat, Kory Anggraini.

Permasalahan yang dibahas pada penelitian ini adalah mencari bentuk penampang yang paling efektif berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, dapat diambil kesimpulan bahwa nilai tegangan minimum penampang pada serat atas ada pada tipe 3 sebesar 0,22 MPa dan pada serat bawah ada pada Tipe 2 sebesar 17,57 MPa. Sedangkan nilai tegangan minimum penampang *box girder* pada serat atas ada pada tipe 1 sebesar -5,46 MPa dan nilai tegangan serat bawah sebesar -13,34 MPa. dari hasil analisis tegangan dapat disimpulkan bahwa penampang *I girder* dan *box girder* adalah penampang Tipe 1 dan Tipe 3.

3. Di dalam jurnal Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi Manado yang berjudul "*Desain Struktur Balok Beton Prategang untuk Bangunan Industry*". (vol.6 No. 11 November 2018) oleh Alexandro Mark Konjongian, Servie O. Dapas, Steenie E. Wallah.

Permasalahan yang dibahas pada penelitian ini adalah peneliti ingin memberika alternatif dengan menggunakan material beton prategang, sehingga dapat diketahui mana balok yang lebih efektif digunakan. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa:

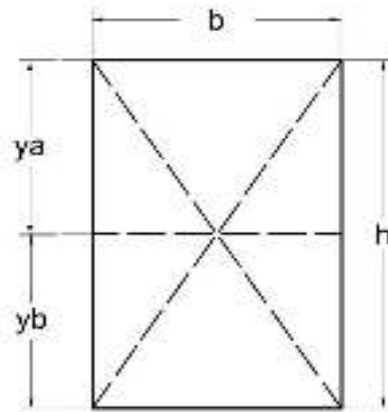
- a. Hasil perencanaan balok beton prategang untuk panjang bentang 30m, dimensi balok prategang yang digunakan adalah balok 1500 mm x 600 mm.
- b. Pada perencanaan beton prategang, gaya prategang penampang berpengaruh terhadap struktur sehingga menjadi beban tambahan yang perlu di perhitungkan.

Dari ketiga jurnal penelitian yang diambil oleh penulis dapat disimpulkan bahwa metode analisa betuk penampang beserta pola-pola perhitunganya tidak jauh berbeda dengan sumber sumber referensi dan buku mengenai pengaruh bentuk penampang terhadap gaya prategang dengan luas penampang yang sama dan mutu mutu beton yang sama akan merujuk pada sumber-sumber tersebut baik jurnal penelitian, buku-buku referensi beton prategang, maupun media internet.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

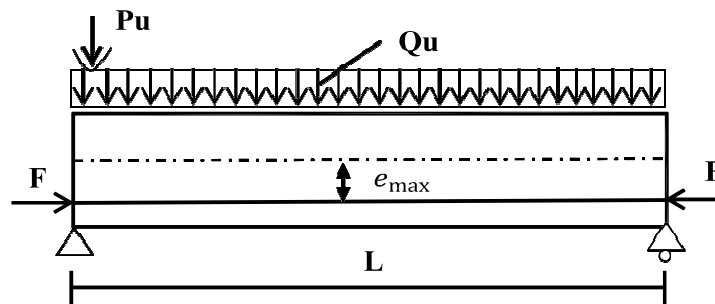
3.1 Analisa Tegangan pada girder bentuk persegi

Analisis penampang digunakan untuk mengetahui luasan, titik berat, momen inersia dan modulus penampang pada balok. Analisis penampang persegi adalah sebagai berikut :



Gambar 3. 1 penampang bentuk persegi

Sumber :hasil penelitian (2022)



Gambar 3. 2 Bentang Balok Jalur Kabel Lurus Dengan eksentrisitas

Sumber :hasil penelitian (2022)

Analisa perhitungan sebagai berikut :

1. Menghitung luas penampang balok :

$$A = b \times h \quad (3.1)$$

2. Menghitung titik berat penampang :

$$y = y_a = y_b = - h \quad (3.2)$$

3. Menghitung inersia :

$$I = \frac{1}{12} b \times h^3 \quad (3.1.3)$$

4. Modulus penampang beton

$$W_a = W_b = \frac{I}{y} \quad (3.1.4a)$$

5. Inti kern (kern atas dan kern bawah)

$$y_a = \frac{I}{W_a} \quad (3.1.5a)$$

$$y_b = \frac{I}{W_b} \quad (3.1.5b)$$

6. Beban mati (berat sendiri balok) :

$$q_D = \text{luas penampang } (A) \times \text{berat isi beton } (\gamma) \quad (3.1.6)$$

7. Menghitung momen pada balok :

a. Momen akibat beban mati

$$M_D = - \frac{1}{2} q_D \times L^2 \quad (3.1.7a)$$

b. Momen akibat beban hidup

$$M_L = - \frac{1}{2} q_L \times L^2 + - \frac{1}{4} P \times L \quad (3.1.7b)$$

c. Momen maksimum akibat Beban Mati dan Beban Hidup :

$$M = 1,2 M_D + 1,6 M_L \quad (3.1.7c)$$

d. Momen nominal yang dapat dipikul penampang :

$$M_n = \frac{M}{\phi} \text{ , dimana : } \phi = 0,85 \quad (3.1.7d)$$

8. Gaya prategang

a. Tegangan pada serat bawah

$$\sigma_b = \frac{M}{I} y_b - \frac{P}{A} \quad (3.3.8a)$$

(3.3.8a)

b. Gaya prategang saat jacking

$$P_j = \frac{M_j}{e} \quad (3.3.8b)$$

0 0

Berdasarkan kedua rumus diatas maka diperoleh jumlah tendon yang digunakan dapat ditentukan dengan rumus :

$$\frac{0}{0} \quad (3.3.8c)$$

c. Jumlah untaian kawat (*strand cable*)

$$\frac{0}{0} \quad (3.3.8d)$$

d. Persentase tegangan leleh yang timbul pada baja (*% jacking force*) :

$$\frac{0}{0} \quad (3.3.8d)$$

e. Gaya prategang akibat *jacking* :

$$(3.3.8d)$$

Maka gaya prategang efektif (setelah mengalami kehilangan gaya prategang)

$$00 \quad (3.3.8d)$$

9. Menghitung Tegangan sesaat transfer gaya prategang :

a. Tegangan tarik pada serat bawah balok :

$$f_b = \text{---} \quad (3.3.9a)$$

b. Tegangan tarik pada serat atas balok :

$$f_a = \text{---} \quad (3.3.9b)$$

10. Menghitung Tegangan pada kondisi layan :

a. Tegangan tarik pada serat bawah balok :

$$f_b = \text{---} \quad (3.3.10a)$$

b. Tegangan tarik pada serat atas balok :

$$f_a = \text{---} \quad (3.3.1b)$$

11. Analisa lendutan

Batas lendutan maksimum

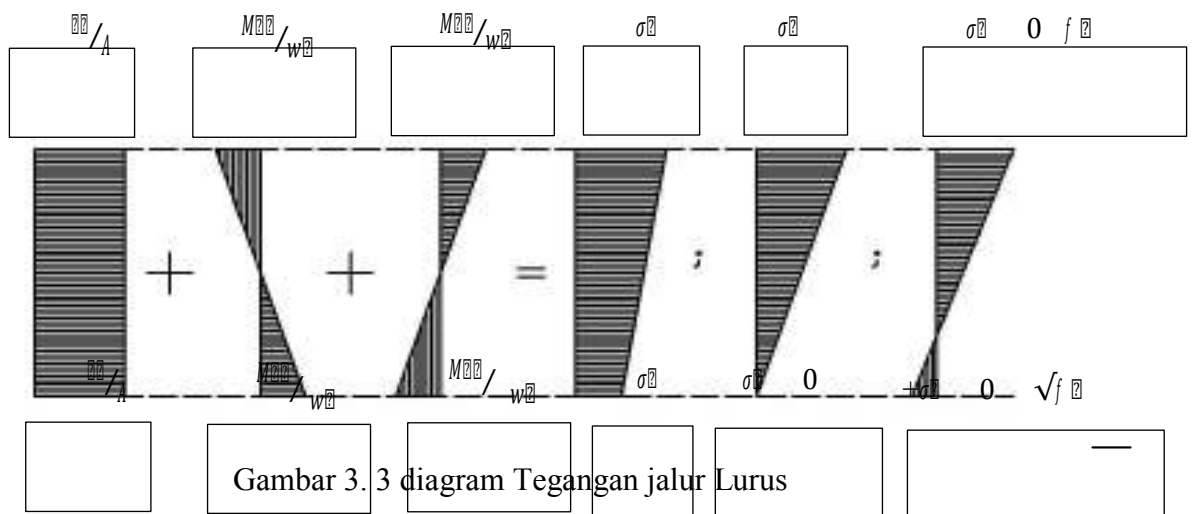
$$\frac{M}{I} \quad (3.3.11a)$$

Modulus elastisitas beton

$$E_c \sqrt{f_c} \quad (3.3.11b)$$

Lenduta jalur kabel lurus eksentris

$$(3.3.11c)$$



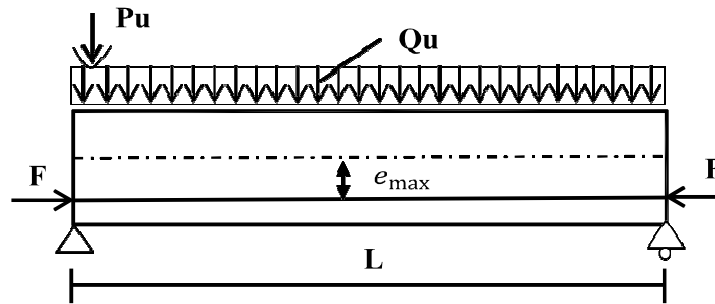
Sumber :hasil penelitian (2022)

Kemungkinan tegangan yang terjadi :

1. Seluruh penampang negatif
2. Sebagian penampang negative tapi 0
3. Sebagian besar penampang negative tetapi 0

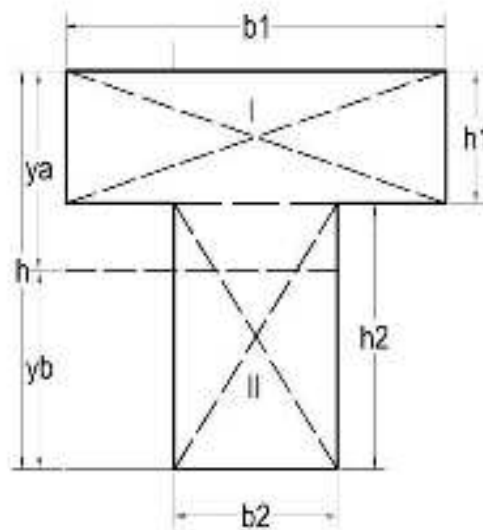
3.2 Analisa Tegangan pada girder bentuk T

Analisis penampang digunakan untuk mengetahui luasan, titik berat, momen inersia dan modulus penampang pada balok. Analisis penampang bentuk T adalah sebagai berikut :



Gambar 3. 4 Bentang Balok Jalur Kabel Lurus Dengan Eksentrisitas

Sumber :hasil penelitian (2022)



Gambar 3. 5 Penampang Bentuk T

Sumber :hasil penelitian (2022)

Analisa perhitungan sebagai berikut :

1. Menghitung luas penampang balok :

$$(3.2.1a)$$

$$(3.2.1b)$$

(3.2.1c)

2. Menghitung titik berat pada penampang :

(3.2.2a)

—

(3.2.2b)

—

(3.2.2c)

—————

(3.2.2d)

—

(3.2.2e)

—

(3.2.2f)

—————

Uji kebenaran

(3.2.2.g)

3. Menghitung inersia :

(3.2.3a)

(3.2.3b)

(3.2.3c)

— { }

(3.2.3d)

— { (—) }

(3.2.3e)

— { (—) }

(3.2.3f)

(3.2.3g)

4. Momen perlawanan

$$\frac{0}{0} \frac{0}{0} \frac{0}{0} \quad (3.2.4)$$

5. Inti kern atas dan bawah

$$\frac{0}{0} \quad (3.2.5a)$$

$$\frac{0}{0} \quad (3.2.5b)$$

6. Beban mati (berat sendiri balok) :

$$q_D = \text{luas penampang } (A) \times \text{berat isi beton } (\gamma) \quad (3.2.6)$$

7. Menghitung momen pada balok :

a. Momen akibat beban mati

$$M_D = -x q_D \times L^2 \quad (3.2.7a)$$

b. Momen akibat beban hidup

$$M_L = -x q_L \times L^2 + -x P \times L \quad (3.2.7b)$$

c. Momen maksimum akibat Beban Mati dan Beban Hidup :

$$M_u = 1,2 M_D + 1,6 M_L \quad (3.2.7c)$$

d. Momen nominal yang dapat dipikul penampang :

$$M_n = \frac{0}{0} / \text{, dimana : } \phi = 0,85 \quad (3.2.7d)$$

8. Gaya prategang

a. Tegangan pada serat bawah

$$\frac{0}{0} \frac{0}{0} \frac{0}{0} \quad 0$$

$$(3.3.7a)$$

b. Gaya prategang saat jacking

$$\frac{0}{0} \quad (3.3.7b)$$

$$0 \quad 0$$

Berdasarkan kedua rumus diatas maka diperoleh jumlah tendon yang digunakan dapat ditentukan dengan rumus :

$$\frac{0}{0} \quad (3.3.8c)$$

a. Jumlah untaian kawat (*strand cable*)

$$\frac{0}{0} \quad (3.3.8d)$$

b. Persentase tegangan leleh yang timbul pada baja (% *jacking force*) :

$$\frac{0}{0} \quad (3.3.8d)$$

c. Gaya prategang akibat *jacking* :

$$(3.3.8d)$$

Maka gaya prategang efektif (setelah mengalami kehilangan gaya prategang)

$$00 \quad (3.3.8d)$$

9. Menghitung Tegangan sesaat transfer gaya prategang :

a. Tegangan tarik pada serat bawah balok :

$$f_b = \text{---} \quad (3.3.9a)$$

b. Tegangan tarik pada serat atas balok :

$$f_a = \text{---} \quad (3.3.9b)$$

10. Menghitung Tegangan pada kondisi layan :

c. Tegangan tarik pada serat bawah balok :

$$f_b = \text{---} \quad (3.3.10a)$$

d. Tegangan tarik pada serat atas balok :

$$f_a = \text{---} \quad (3.3.1b)$$

11. Analisa lendutan

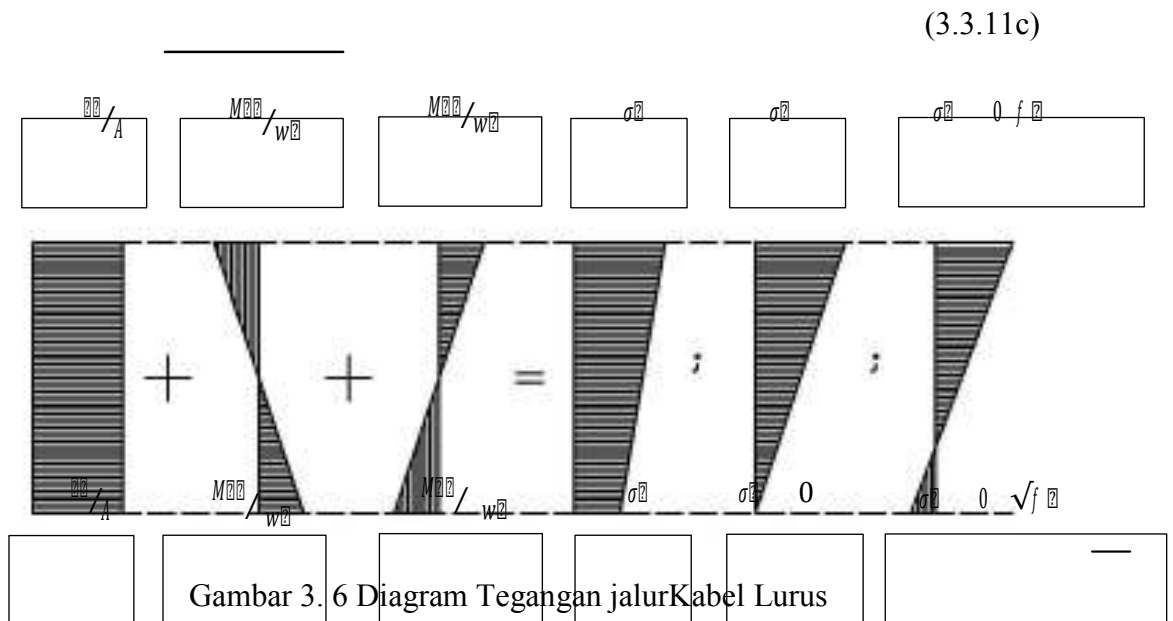
Batas lendutan maksimum

$$\frac{M}{A} - \frac{M e}{w} \quad (3.3.11a)$$

Modulus elastisitas beton

$$0.00\sqrt{f_c} \quad (3.3.11b)$$

Lenduta jalur kabel lurus eksentris



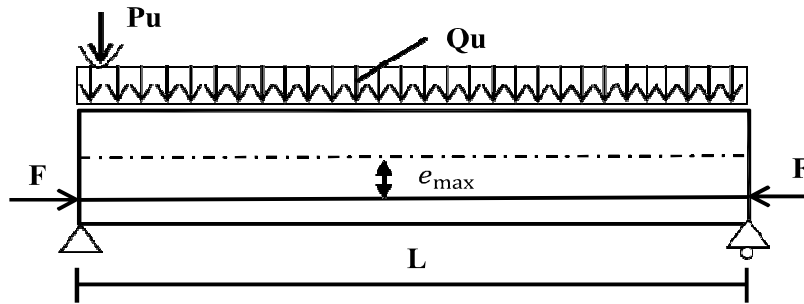
Sumber :hasil penelitian (2022)

Kemungkinan tegangan yang terjadi :

1. Seluruh penampang negatif
2. Sebagian penampang negative tapi $\sigma_c = 0$
3. Sebagian besar penampang negative tetapi $\sigma_c = 0$

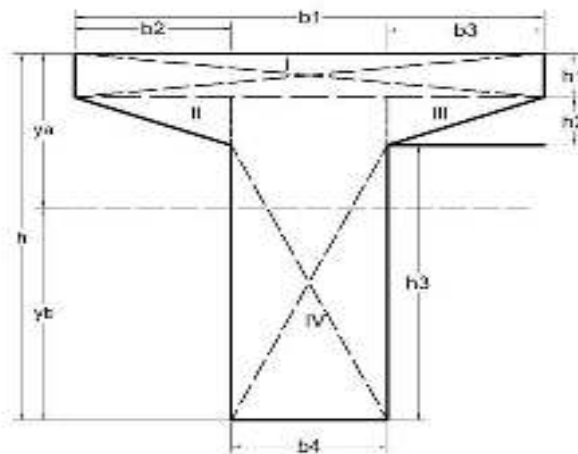
3.3 Analisa Tegangan pada girder bentuk Y

Analisis penampang digunakan untuk mengetahui luasan, titik berat, momen inersia dan modulus penampang pada balok. Analisis penampang bentuk Y padalah sebagai berikut :



Gambar 3. 7 bentang Balok Jalur Kabel Lurus Dengan eksentrisitas

Sumber :hasil penelitian (2022)



Gambar 3. 8 penampang Bentuk Y

Sumber :hasil penelitian (2022)

Analisa perhitungan sebagai berikut :

1. Menghitung luas penampang balok :

$$(3.3.1a)$$

–

$$(3.3.1b)$$

–

$$(3.3.1c)$$

$$(3.3.1d)$$

(3.3.1e)

2. Menghitung titik berat penampang :

(3.3.2a)

—

(3.3.2b)

—

(3.3.2c)

—

(3.3.2d)

—

(3.3.2e)

—

(3.3.2f)

—

(3.3.2g)

(3.3.2h)

Uji kebenaran

(3.2.2i)

3. Menghitung inersia :

(3.3.3a)

(3.3.3b)

(3.3.3c)

(3.3.3d)

(3.3.3e)

— { }

(3.3.3f)

{— } { }

$$— \quad \{ \quad (-) \} \quad (3.3.3g)$$

$$— \quad \{ \quad (-) \} \quad (3.3.3h)$$

$$(3.3.3i)$$

4. Momen perlawanan

$$— \quad — \quad (3.26a)$$

5. Inti kern atas dan bawah

$$— \quad (3.3.5a)$$

$$— \quad — \quad (3.3.5b)$$

6. Beban mati (berat sendiri balok) :

$$q_D = \text{luas penampang } (A) \times \text{berat isi beton } (\gamma) \quad (3.3.6)$$

7. Menghitung momen pada balok :

a. Momen akibat beban mati

$$M_D = -x \ q_D \times L^2 \quad (3.3.7a)$$

b. Momen akibat beban hidup

$$M_L = -x \ q_L \times L^2 + -x \ P \times L \quad (3.3.7b)$$

c. Momen maksimum akibat Beban Mati dan Beban Hidup :

$$M_u = 1,2 \ M_D + 1,6 \ M_L \quad (3.3.7c)$$

d. Momen nominal yang dapat dipikul penampang :

$$M_n = \quad / \quad , \text{dimana : } \phi = 0,85 \quad (3.3.7d)$$

b. Tegangan tarik pada serat atas balok :

$$f_a = \frac{M}{I} \left(\frac{h}{2} + e \right) \quad (3.3.1b)$$

11. Analisa lendutan

Batas lendutan maksimum

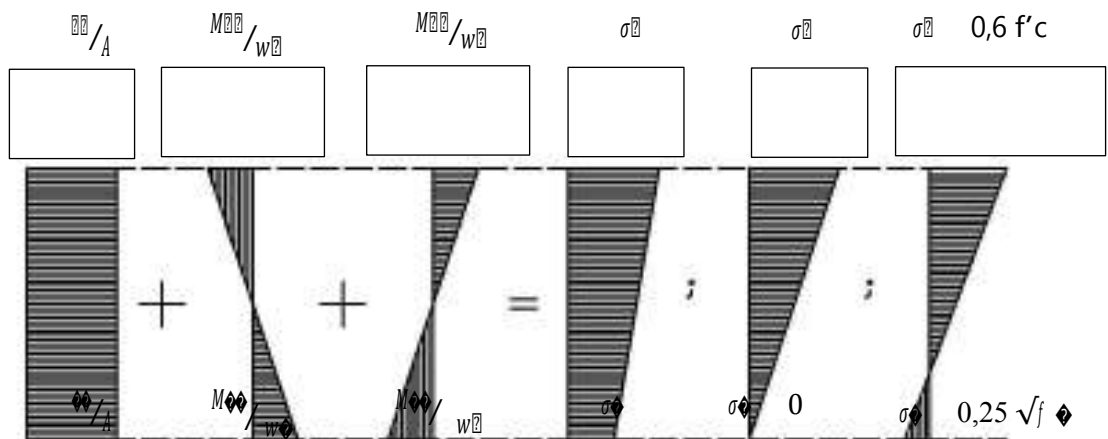
$$\frac{M_{max}}{EI} \quad (3.3.11a)$$

Modulus elastisitas beton

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (3.3.11b)$$

Lenduta jalur kabel lurus eksentris

$$\frac{M_{max}}{EI} \left(\frac{h}{2} + e \right) \quad (3.3.11c)$$



Gambar 3. 9 Diagram Tegangan Jalur Kabel Lurus

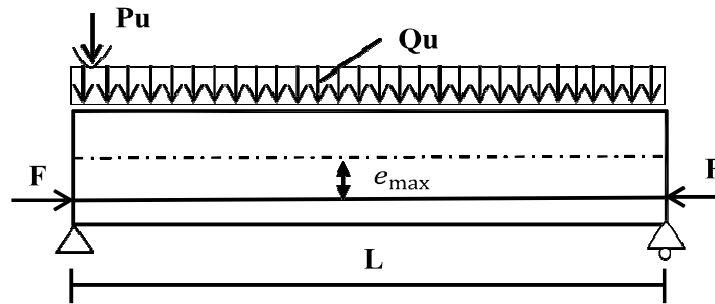
Sumber : hasil penelitian (2022)

Kemungkinan tegangan yang terjadi :

1. Seluruh penampang negatif
2. Sebagian penampang negative tapi $\sigma_c > 0$
3. Sebagian besar penampang negative tetapi $\sigma_c > 0$

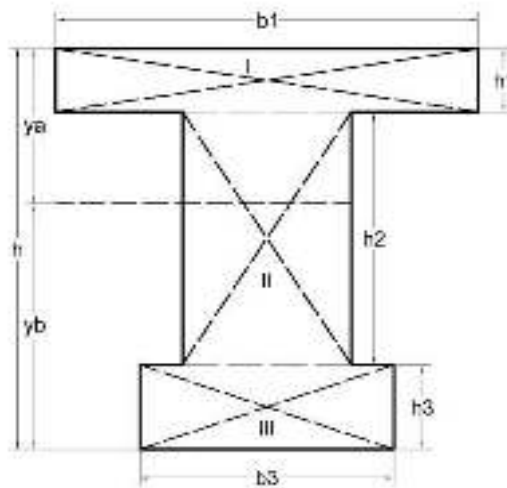
3.4 Analisa Tegangan pada girder bentuk I

Analisis penampang digunakan untuk mengetahui luasan, titik berat, momen inersia dan modulus penampang pada balok. Analisis penampang bentuk I adalah sebagai berikut :



Gambar 3. 10 bentang balok jalur kabel Lurus Dengan Eksentrisitas

Sumber :hasil penelitian (2022)



Gambar 3. 11 Penampang Bentuk I

Sumber :hasil penelitian (2022)

Analisa perhitungan sebagai berikut :

1. Menghitung luas penampang balok :

$$(3.4.1a)$$

$$(3.4.2b)$$

$$(3.4.2c)$$

(3.4.2d)

2. Menghitung titik berat pada penampang :

(3.4.2a)

—

(3.4.2b)

—

(3.4.2c)

—

(3.4.2d)

—————

(3.4.2e)

—

(3.4.2f)

—

(3.4.2g)

—

(3.4.2h)

—————

Uji kebenaran

(3.4.2i)

3. Menghitung inersia :

(3.4.3a)

(3.4.3b)

(3.4.3c)

(3.4.3d)

(3.4.3e)

— { }

$$- \quad \{ \quad (-) \} \quad (3.4.3f)$$

$$- \quad \{ \quad (-) \} \quad (3.4.3g)$$

$$- \quad \{ \quad \} \quad (3.4.3h)$$

$$(3.4.3i)$$

4. Momen perlawanan

$$- \quad - \quad (3.4.4)$$

5. Inti kern atas dan bawah

$$- \quad (3.4.5a)$$

$$- \quad - \quad (3.4.5b)$$

6. Beban mati (berat sendiri balok) :

$$q_D = \text{luas penampang } (A) \times \text{berat isi beton } (\gamma) \quad (3.4.6)$$

7. Menghitung momen pada balok :

a. Momen akibat beban mati

$$M_D = -x \ q_D \times L^2 \quad (3.4.7a)$$

b. Momen akibat beban hidup

$$M_L = -x \ q_L \times L^2 + -x \ P \times L \quad (3.4.7b)$$

c. Momen maksimum akibat Beban Mati dan Beban Hidup :

$$M_u = 1,2 \ M_D + 1,6 \ M_L \quad (3.4.7c)$$

d. Momen nominal yang dapat dipikul penampang :

$$M_n = \quad / \quad , \text{dimana : } \phi = 0,85 \quad (3.4.7d)$$

8. Menghitung Tegangan sesaat transfer gaya prategang :

a. Tegangan pada serat bawah balok :

$$f_b = \frac{M}{I} y \quad (3.4.8a)$$

b. Tegangan tekan pada serat atas balok :

$$f_a = \frac{M}{I} y \quad (3.4.8b)$$

9. Menghitung Tegangan pada saat kondisi layan :

a. Tegangan pada serat bawah balok :

$$f_b = \frac{M}{I} y \quad (3.4.8a)$$

b. Tegangan pada serat atas balok :

$$f_a = \frac{M}{I} y \quad (3.4.8b)$$

10. Analisa lendutan

Batas lendutan maksimum

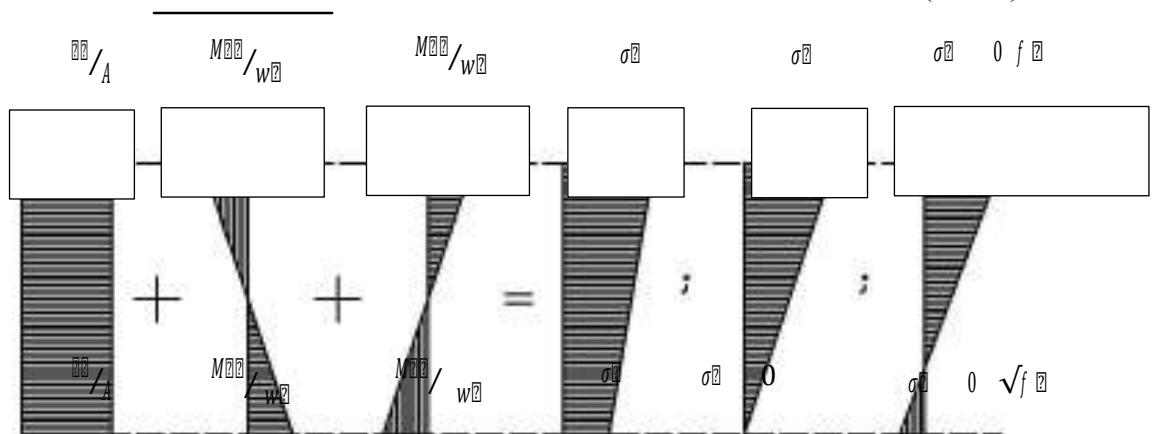
$$\frac{M}{EI} \quad (3.4.9a)$$

Modulus elastisitas beton

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (3.4.9b)$$

Lenduta jalur kabel lurus eksentris

$$(3.4.9c)$$



Gambar 3. 12 diagram tegangan jalur kabel Lurus

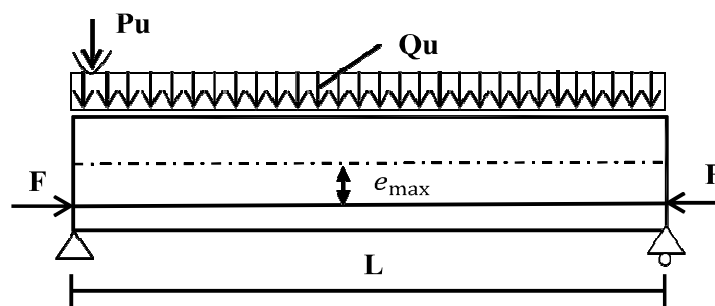
Sumber :hasil penelitian (2022)

Kemungkinan tegangan yang terjadi :

1. Seluruh penampang negatif
2. Seluruh penampang negative tapi 0
3. Sebagian besar penampang negative tetapi 0

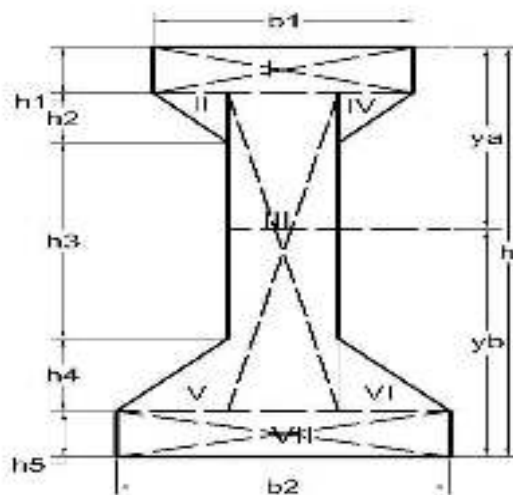
3.5 Analisa Tegangan pada girder bentuk I tidak simetris

Analisis penampang digunakan untuk mengetahui luasan, titik berat, momen inersia dan modulus penampang pada balok. Analisis penampang bentuk I tidak simetris adalah sebagai berikut :



Gambar 3. 13 bentang balok Jalur Kabel Lurus Dengan eksentisitas

Sumber :hasil penelitian (2022)



Gambar 3. 14 Penampang Bentuk I

Sumber :hasil penelitian (2022)

Analisa perhitungan sebagai berikut :

1. Menghitung luas penampang balok :

(3.5.1a)

- (3.5.1b)

(3.5.1c)

- (3.5.1d)

(3.5.1e)

(3.5.1f)

2. Menentukan jarak garis netral keserat terluar atas dan bawah :

- (3.5.2a)

- (3.5.2b)

- (3.5.2c)

- (3.5.2d)

- (3.5.2e)

(3.5.2f)

- (3.5.2g)

- (3.5.2h)

-

$$- \quad (3.5.2i)$$

$$- \quad (3.5.2j)$$

Uji kebenaran (3.5.2k)

3. Menghitung inersia : (3.5.3a)

$$(3.5.3b)$$

$$(3.5.3c)$$

$$(3.5.3d)$$

$$(3.5.3e)$$

$$(3.5.3f)$$

$$- \quad \{ \quad \} \quad (3.5.3g)$$

$$\{ - \quad \} \quad \{ \quad \} \quad (3.5.3h)$$

$$- \quad \{ \quad (-) \} \quad (3.5.3i)$$

$$- \quad \{ \quad (-) \} \quad (3.5.3j)$$

$$\{ - \quad \} \quad \{ \quad \} \quad (3.5.3k)$$

$$- \quad \{ \quad \} \quad (3.5.3l)$$

$$(3.5.3m)$$

4. Momen perlawanan (3.5.4)

$$- \quad -$$

c. Jumlah untaian kawat (*strand cable*)

$$\frac{0}{0} \quad (3.3.8d)$$

d. Persentase tegangan leleh yang timbul pada baja (*% jacking force*) :

$$\frac{0}{0} \quad (3.3.8d)$$

e. Gaya prategang akibat *jacking* :

$$(3.3.8d)$$

Maka gaya prategang efektif (setelah mengalami kehilangan gaya prategang)

$$00 \quad (3.3.8d)$$

9. Menghitung Tegangan sesaat transfer gaya prategang :

a. Tegangan tarik pada serat bawah balok :

$$f_b = \text{---} \quad (3.3.9a)$$

b. Tegangan tarik pada serat atas balok :

$$f_a = \text{---} \quad (3.3.9b)$$

11. Menghitung Tegangan pada kondisi layan :

a. Tegangan tarik pada serat bawah balok :

$$f_b = \text{---} \quad (3.3.10a)$$

b. Tegangan tarik pada serat atas balok :

$$f_a = \text{---} \quad (3.3.1b)$$

12. Analisa lendutan

Batas lendutan maksimum

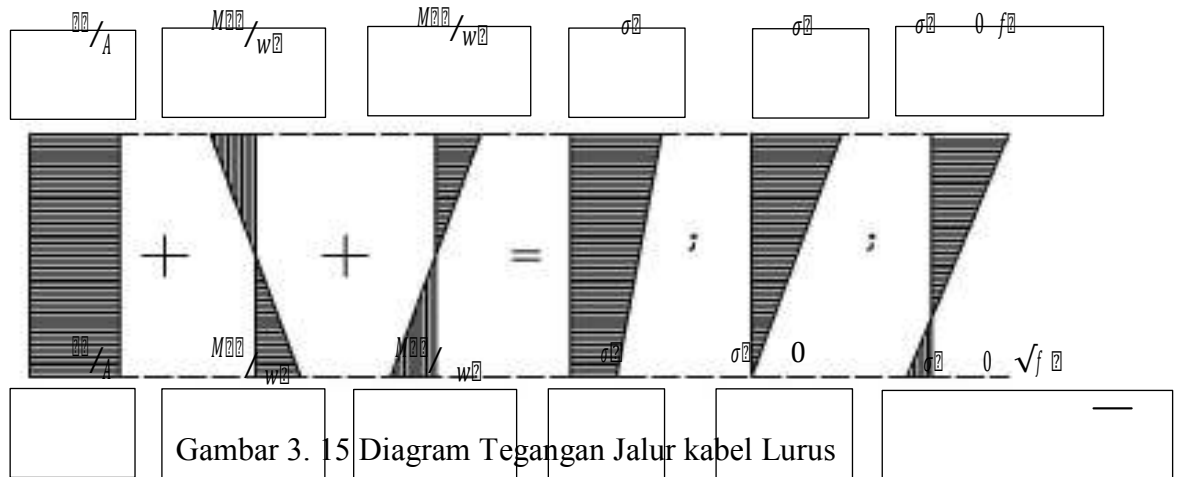
$$\frac{\text{---}}{0} \quad (3.3.11a)$$

Modulus elastisitas beton

$$00\sqrt{\text{---}} \quad (3.3.11b)$$

Lenduta jalur kabel lurus eksentris

(3.3.11c)



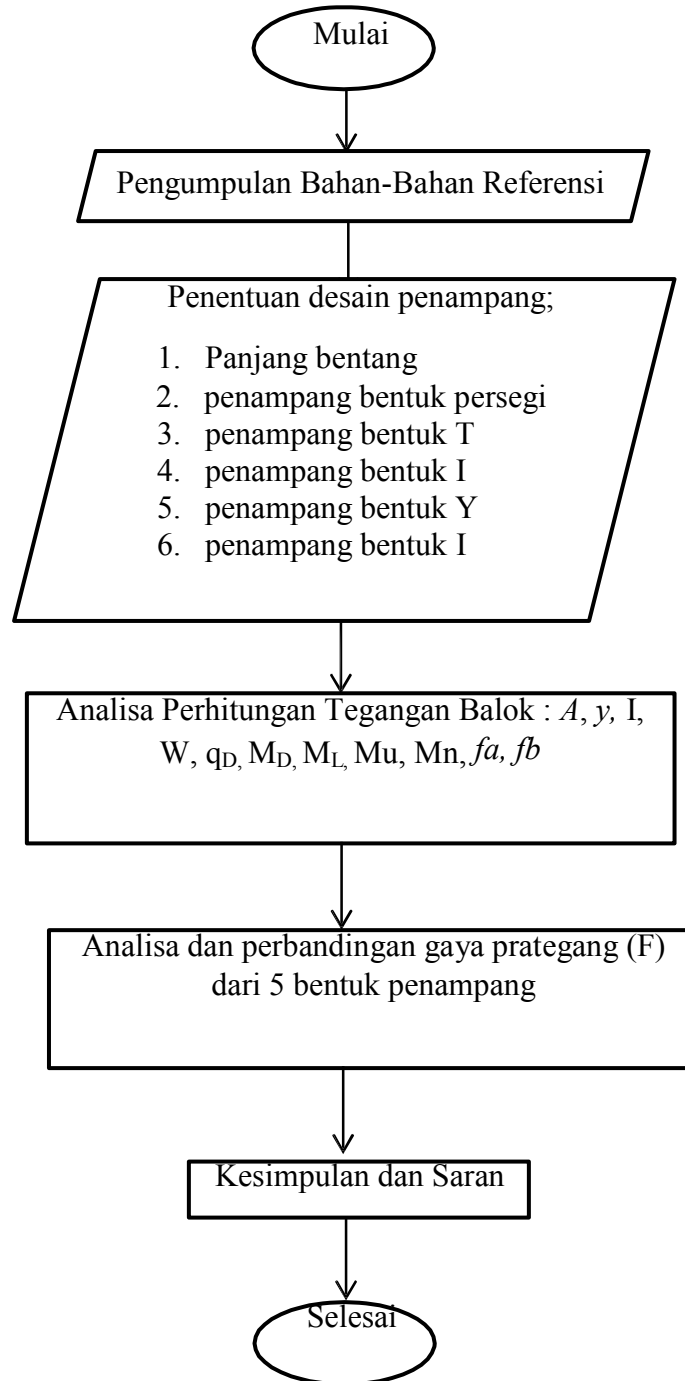
Sumber :hasil penelitian (2022)

Kemungkinan tegangan yang terjadi :

1. Seluruh penampang negatif
2. Sebagian penampang negative tapi 0
3. Sebagian besar penampang negative tetapi 0

3.6 Diagram Alir

Adapun tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini digambarkan pada Bagan Alir penelitian pada gambar berikut



Gambar 3. 16 Bagan Alir Penelitian