

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Beton Bertulang

Beton memiliki kuat tekan yang sangat tinggi. Nilai dari kuat tekan dapat diuji dalam bentuk silinder dengan alat *compression testing machine*. Beton bertulang adalah beton yang dalamnya berisi tulangan dengan asumsi kedua bahan bekerja sama untuk memikul gaya.

a. Kuat Desak Beton

Kuat desak beton adalah kemampuan beton untuk menerima gaya desak persatuan luas.

Rumus kuat desak beton :

$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

Keterangan :

f_c' = Kuat Desak (MPa)

P = Beban Desak (N)

A = Luas Penampang Benda Uji (mm^2)

b. Modulus Elastisitas Beton

Modulus elastisitas adalah perbandingan dari desakan yang diberikan dengan perubahan bentuk persatuan panjang, sebagai akibat dari desakan yang diberikan itu (Murdock dan Brook, 1986). Berbeda dengan baja, modulus elastisitas beton dapat berubah-ubah tergantung kekuatan. Umur beton, sifat dari agregat dan semen, kecepatan pembebanan, jenis dan

ukuran dari benda uji juga berpengaruh terhadap besar kecilnya modulus elastisitas.

Sesuai dengan SK SNI T-15-1990-03 Pasal 3.1.5, digunakan rumus nilai modulus elastisitas beton sebagai berikut :

$$E_c = 0,043 \times W_c^{1.5} \times \sqrt{f_c'} \quad (3.2)$$

Keterangan :

E_c = Modulus Elastisitas Beton Desak (MPa)

W_c = Berat Isi Beton (kg/m^3)

f_c' = Kuat Desak Beton (MPa)

Rumus tersebut hanya berlaku untuk beton yang berkisar antara 1500-2500 kgf/m^3 .

Beton dengan kepadatan normal dengan berat isi $\pm 23 \text{ kN/m}^3$ dapat digunakan dengan rumus sebagai berikut :

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c'} \quad (3.3)$$

Keterangan :

E_c = Modulus Elastisitas Beton Desak (MPa)

f_c' = Kuat Desak Beton (MPa)

Nilai modulus elastisitas dapat dicari dengan rumus sebagai berikut sesuai dengan hukum Hooke dengan nilai tegangan regangan pada kondisi elastis linier :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3.4)$$

Keterangan :

σ = Tegangan (MPa)

ϵ = Regangan

E = Modulus Elastisitas (MPa)

c. Kekakuan (*stiffness*)

Kekakuan (*stiffness*) adalah kemampuan suatu elemen material untuk bersifat kaku. Pembatasan kekakuan berfungsi untuk menjaga konstruksi agar tidak melendut melebihi syarat yang telah ditentukan.

Gaya yang dibutuhkan untuk memperoleh satu unit *displacement* disebut kekakuan. Sudut kemiringan dari hubungan beban dan lendutan disebut dengan nilai kekakuan. Besar tidaknya nilai kekakuan didasari oleh besarnya kekakuan pada struktur.

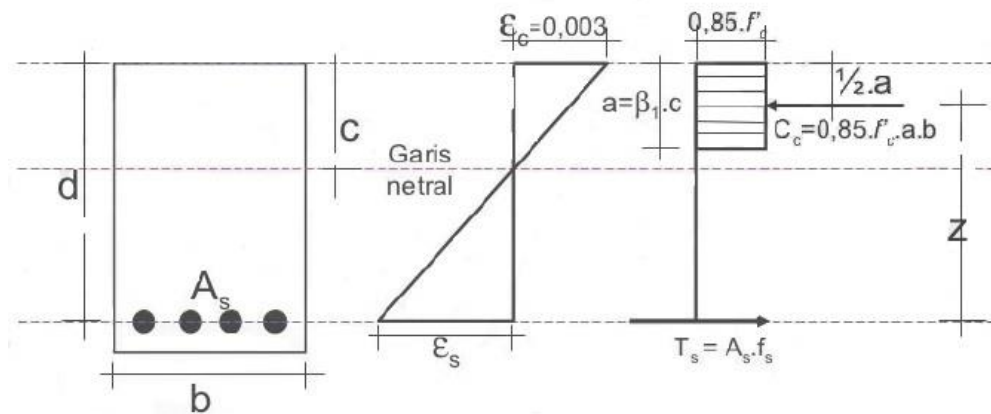
$$K = \frac{P}{\delta} \quad (3.5)$$

Keterangan :

P = Beban (kN)
K = Kekakuan / Stiffness(kN/mm)
 δ = Lendutan (mm)

3.2 Balok Beton Tulangan Tunggal

Dalam perancangan struktur beton bertulang, hal pertama yang harus dilakukan adalah membuat perencanaan mengenai struktur beton bertulang yang akan dibuat. Dalam penelitian ini direncanakan struktur beton bertulang tunggal, sehingga Gaya tekan pada balok beton bertulang tunggal hanya akan ditahan oleh beton dan gaya tariknya ditahan oleh tulangan baja.



Gambar 3.1 Distribusi Tegangan dan Regangan pada Penampang Balok Tulangan Tunggal. Sumber : Siahaan (2014)

Analisa balok tulangan tunggal.

1. Ditentukan rasio penulangan terlebih dahulu.

karena $f_c' > 28$ maka menggunakan rumus :

$$\beta_1 = 0,85 - \left(\frac{f_c' - 28}{7} \times 0,05 \right), \text{ minimal } 0,65 \quad (3-6)$$

$$\rho = \frac{10,85 \times f_c}{f_y} \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times R_n}{0,85 \times f_c}} \right) \quad (3-7)$$

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y} \quad (3-8)$$

$$\rho_{maks} = 0,429 \times (0,85 \times f'c \times \beta_1) / f_y \quad (3-9)$$

jika $\rho_{min} < \rho < \rho_{maks}$, maka digunakan tulangan tunggal

2. Menentukan luas tulangan perlu :

$$A_s = \rho \times b \times d \quad (3-10)$$

3. Menentukan jumlah tulangan (n) :

$$n = \frac{A_s}{\left(\frac{1}{4} \times \pi \times d\right)} \quad (3-11)$$

4. Menghitung kapasitas lentur :

$$C_c = (A_s \times f_y) / (0,85 \times f'c' \times b) \quad (3-12)$$

$$M_n = \left[A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2} \right) \right] \quad (3-13)$$

$$M_u = \phi \times M_n \quad (3-14)$$

Keterangan :

C_c = Gaya pada daerah tekan penampang (N)

A_s = Luas tulangan tarik (mm²)

$A_{s \min}$ = Luas tulangan tarik minimum (mm²)

n = Jumlah tulangan balok

ρ = Rasio penulangan

ρ_{min} = Rasio penulangan maksimum

ρ_{maks} = Rasio penulangan maksimum

ρ_b = Rasio penulangan dalam keadaan seimbang

f_y = Tegangan luluh baja pada daerah tarik balok (MPa)

d = Jarak dari serat tarik terluar ke titik berat tulangan tarik longitudinal (mm)

a = Tinggi blok tegangan beton tekan persegi ekuivalen (mm)

ϕ = Faktor reduksi

β_1 = Faktor pembentuk tegangan beton tekan persegi ekuivalen

1. Untuk $f'c' \leq 28$ MPa (300 kg/cm²) berlaku $\beta_1 = 0,85$

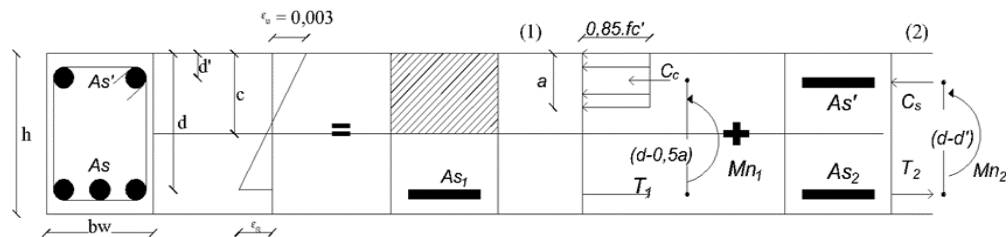
2. Untuk $f'c' > 28$ MPa (300 kg/cm²) berlaku $\beta_1 = 0,85 - 0,005 \cdot ((f'c' - 28) / 7) \geq 0,65$

3. Nilai β_1 tidak boleh diambil kurang dari 0,65

M_u = Momen *ultimate* (Nmm)

M_n = Momen nominal (Nmm)

3.3 Balok Beton Tulangan Rangkap



Gambar 3.2 Distribusi Tegangan dan Regangan pada Penampang Balok dengan Penulangan Rangkap (Siahaan, 2014)

Balok bertulang rangkap memiliki tulangan pada daerah tekan dan daerah tarik. Terciptanya tulangan rangkap karena balok dengan tulangan tunggal tidak mampu menahan kapasitas momen ketika perencanaan struktur. Jika dimensi balok semakin kecil maka tulangan lentur serta tulangan geser (sengkang) yang dibutuhkan semakin banyak, dan lendutan balok semakin besar.

Dalam menganalisis balok bertulang rangkap terdapat dua kondisi, diantaranya :

1. Tulangan tekan sudah luluh

Bila tulangan tekan sudah luluh, maka $f_s' = f_y$

Gambar 3.2 bagian (1) :

$$T_1 = A_{s1} \cdot f_y = C_c \quad (3-15)$$

$$M_{n1} = T_1 (d - 0,5 \cdot a) \quad (3-16)$$

Gambar 3.2 bagian (2) :

$$C_s = A_{s'} \cdot f_y \quad (3-17)$$

$$M_{n2} = C_s (d - d') \quad (3-18)$$

Sehingga momen nominal dan momen *ultimate* balok tulangan rangkap adalah :

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} \quad (3-19)$$

$$M_u = \phi \cdot M_n \quad (3-20)$$

Tulangan tekan (A_s') dianggap leleh bila $\epsilon_s' > \epsilon_y$, dengan nilai ϵ_s' dan ϵ_y adalah sebagai berikut :

$$\epsilon_s' = \frac{\epsilon_{cu} \cdot (c-d')}{c} = \frac{0,003(c-d')}{c} \quad (3-21)$$

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{f_y}{2 \times 10^5} \quad (3-22)$$

2. Tulangan tekan belum luluh

Kondisi tulangan tekan belum luluh bila $\epsilon_s' < \epsilon_y$

$$f_s' \neq f_y \quad (3-23)$$

$$f_s' = E_s \cdot \epsilon_s' \quad (3-24)$$

Sehingga momen nominal dan momen *ultimate* balok tulangan rangkap adalah :

$$M_n = (A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_s') \cdot (d - 0,5 \cdot a) + [A_s' \cdot f_s' \cdot (d - d')] \quad (3-25)$$

$$M_u = \phi \cdot M_n \quad (3-26)$$

Keterangan :

C_c = Gaya pada daerah tekan penampang (N)

C_s = Gaya pada tulangan tekan (N)

A_s = Luas tulangan tarik (mm²)

f_y = Tegangan luluh baja pada daerah tarik balok (MPa)

f_s' = Tegangan luluh baja pada daerah tekan balok (MPa)

d = Jarak dari serat tarik terluar ke titik berat tulangan tarik longitudinal (mm)

d' = Jarak dari serat tekan terluar ke titik berat tulangan tarik longitudinal (mm)

a = Tinggi blok tegangan beton tekan persegi ekuivalen (mm)

c = Jarak antara garis netral dan tepi serat beton tekan (mm)

ϵ_{cu} = Regangan tekan beton pada batas retak (regangan ultimit), yang menurut pasal 12.2.3 SNI 03-2847-2002 diasumsikan sebesar 0,003

E_s = Modulus elastis baja non-prategang dengan nilai sebesar 200.000 MPa (MPa)

Φ = Faktor reduksi

- $\beta 1$ = Faktor pembentuk tegangan beton tekan persegi ekuivalen
- Untuk $f_c' \leq 28$ MPa (280 kg/cm²) berlaku $\beta 1 = 0,85$
 - Untuk $f_c' > 30$ MPa (280 kg/cm²) berlaku

$$\beta 1 = 0,85 - 0,05 \cdot ((f_c' - 28) / 7) \geq 0,65$$
 - Nilai $\beta 1$ tidak boleh diambil kurang dari 0,65
- Mu = Momen *ultimate* (Nmm)
Mn = Momen nominal (Nmm)

3.4 Kuat Geser Beton Bertulang

Beban yang bekerja mengakibatkan balok memikul momen lentur dan juga memikul gaya geser. Gaya geser yang terjadi pada balok sebagian dipikul oleh beton dan sisanya dipikul oleh tulangan geser (umumnya berupa begel/sengkang).

- Kuat geser beton

$$V_c = 0,17 \lambda \sqrt{f_c} b_w d \quad (3-27)$$

- Kuat geser sengkang

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{s} \quad (3-28)$$

- Kebutuhan spasi sengkang

$$S = \frac{A_v \cdot f_{yt} \cdot d}{V_s} \quad (3-29)$$

Keterangan :

- λ = 1,0 untuk Beton Normal
b_w = Lebar Badan Balok (mm)
d = Tinggi Efektif Balok (mm)
A_v = Luas Penampang Sengkang (mm²)
f_{yt} = Tegangan Luluh Sengkang (MPa)
s = Spasi Sengkang (mm)
V_c = Kuat Geser Beton (N)
V_s = Kuat Geser Sengkang (N)

- Dasar perancangan Tulangan Geser

$$\emptyset V_n \geq V_u \quad (3-30)$$

$$\emptyset (V_c + V_s) \geq V_u \quad (3-31)$$

Keterangan :

V_n = Kuat geser nominal balok

V_u = Gaya geser akibat beban total berfaktor

ϕ = Faktor reduksi = 0,75

= Bila $0,5 \phi V_c \geq V_u$ (secara teoritis tidak membutuhkan tulangan geser, biasanya tetap dipasang sengkang dengan jarak bebas)

= Bila $0,5 \phi V_c < V_u \leq \phi V_c$ (dipasang tulangan geser minimum atau dipasang sengkang dengan spasi mengikuti ketentuan spasi maksimum sengkang)

= Bila $V_u > \phi V_c$ (dihitung kebutuhan tulangan geser)

Ketentuan SNI 03-2847-2013

5. Tulangan geser minimum

$$A_{v,\min} = 0,062 \sqrt{f'_c} ((b_w s)/(f_{yt})) \geq ((0,35 b_w s)/(f_{yt})) \quad (3-32)$$

6. Kuat geser yang dipikul sengkang

$$V_s \leq 0,66 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (3-33)$$

7. Spasi maksimum sengkang

$$V_s \leq 0,33 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (s \leq d/2 \text{ atau } 600\text{mm}) \quad (3-34)$$

$$V_s > 0,33 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (s \leq d/4 \text{ atau } 300 \text{ mm}) \quad (3-35)$$

3.5 Kuat Lentur Beton Bertulang

Analisis lentur pada balok bertulang rangkap bergantung terhadap perhitungan kuat nominal momen suatu penampang (Nawy, 1998).

$$Mn_1 = A_{s1} \cdot f_y \cdot (d - \frac{a}{2}) \quad (3-36)$$

$$Mn_2 = A_{s'} \cdot f_y \cdot (d - \frac{a}{2}) \quad (3-37)$$

$$Mn = Mn_1 + Mn_2 \quad (3-38)$$

Tinggi blok tegangan beton ditentukan menggunakan persamaan :

$$a = \frac{A_{s1} \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \quad (3-39)$$

Letak Garis Netral :

$$C = \frac{a}{\beta} \quad (3-40)$$

Keterangan :

- Mn = Momen Nominal Lentur (Kg.cm)
 a = Tinggi Blok Tegangan Tulangan Tekan(mm²)
 C = Jarak Serat Terluar ke Garis Netral (cm)
 d = Jarak Serat Terluar menuju Pusat Tulangan Tarik (cm)
 d' = Jarak Serat Tekan Terluar menuju Pusat Tulangan Tekan (cm)

3.6 Lendutan Pada Balok Bertulang Rangkap

Menurut Nawy (1998), balok yang dibebani pada dua titik pembebanan dan mengalami lendutan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$\Delta_{ultimit} = 0,125 \times \varphi_u \times l^2 \quad (3-41)$$

$$\varphi_u = 0,7 \frac{\varepsilon_u}{c} [100(\rho - \rho')]^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho - \rho'}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{Bila } (\rho - \rho' < 0.03) \quad (3-42)$$

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_u}{c}$$

$$\text{Bila } (\rho - \rho' > 0.03) \quad (3-43)$$

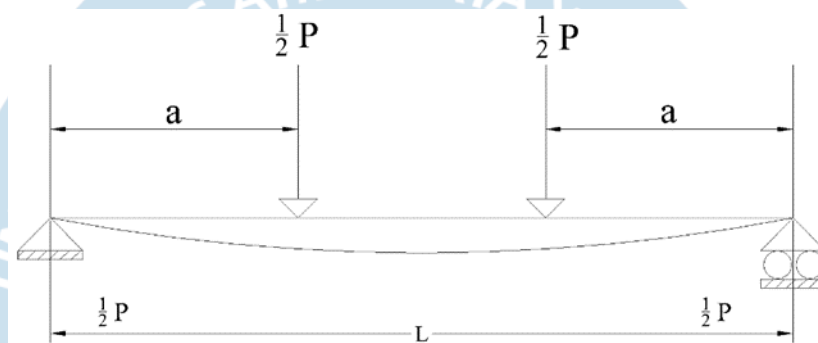
Keterangan :

- Δ_{ult} = Lendutan Beban Ultimit di tengah Bentang (mm)
 φ_u = Kurvatur ultimit (radius/mm)
 L = Panjang Bentang (mm)
 ε_u = Regangan Ultimit pada Beton
 c = Jarak Serat Terluar Menuju Garis Netral (mm)
 ρ = Rasio Tulangan Tarik ($\frac{A_s}{b \cdot d}$)
 ρ' = Rasio Tulangan Tekan ($\frac{A_s'}{b \cdot d}$)

Balok yang diberikan beban pada saat pengujian akan mengalami defleksi atau lendutan. Beban yang semakin besar pada balok akan mengakibatkan

deformasi dan regangan tambahan sehingga mengakibatkan muncul dan bertambahnya retak lentur disepanjang bentang balok (Nawy, 1990).

Sifat yang terlalu fleksibel atau lentur pada balok dapat disebut tidak layak walaupun sudah dicek keamanannya pada lentur dan geser. Oleh sebab itu defleksi atau deformasi harus ditinjau (Spiegel dan Limbrunner, 1991). Lentutan dapat ditinjau pada gambar 3.3



Gambar 3.3 Lentutan Pada Balok Akibat Beban Terpusat

Lentutan pada balok dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$EI\Delta = \frac{1}{2} \left(\frac{L}{2} \right) \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{2L}{3} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{L-2a}{2} \right) \times \left[- \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{L-2a}{2} \right) \right] \left[a + \frac{2}{3} \left(\frac{L-2a}{2} \right) \right] \quad (3-44)$$

$$I\Delta = \left(\frac{PL^2}{16} - \frac{P \cdot a^3}{12} \right) \quad (3-45)$$

$$\Delta = \frac{PL^3}{48EI} \left(\frac{3 \cdot a}{L} - \frac{4 \cdot a^3}{L^3} \right) \quad (3-46)$$

Keterangan :

- E = Modulus elastisitas beton (MPa)
- I = Momen inersia pada balok bertulang (mm^4)
- Δ = Defleksi (mm)
- P = Beban luar (N)
- L = Panjang Bentang balok (mm)
- a = Jarak Beban Dari Tumpuan (mm)