

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Beton Bertulang

Beton bertulang adalah beton yang ditulangi tidak kurang dari jumlah baja prategang maupun tulangan nonprategang minimum yang telah ditetapkan (SNI 2847:2019).

Sifat utama beton adalah memiliki kekuatan tekan yang tinggi. Namun kelemahan beton adalah lemahnya dalam mendukung beban tarik. Oleh sebab itu dalam beton dikombinasikan dengan tulangan baja sehingga mampu memikul kekuatan tekan dan tarik sehingga dihasilkan suatu kesatuan yang komposit yaitu beton bertulang.

3.2 Kuat Tekan Beton.

Yang dimaksud dengan kuat tekan beton adalah kemampuan beton dalam menerima gaya desakan dalam satuan luasan. Beton memiliki sifat kuat tekan yang tinggi dimana kemampuan tekannya diuji dengan alat *compressing testing machine* dan bentuk benda uji berupa silinder atau kubus beton.

Hasil beban maksimal yang ditunjukkan dari pengujian tekan beton kemudian digunakan sebagai dasar untuk menentukan kuat tekan beton, yaitu dengan menggunakan persamaan 3.1. berikut ini.

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (3-1)$$

Keterangan :

f_c = Kuat tekan beton (MPa)
 P = Beban tekan (N)
 A = Luas Penampang Benda Uji (mm^2)

3.3 Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas adalah indikator yang menunjukkan ketahanan suatu bahan saat terjadi deformasi elastis ketika di aplikasikan gaya pada benda tersebut. Modulus elastisitas juga dapat menunjukkan tanda keelastisitas dari bahan tersebut. Beton pada modulus elastisitasnya juga bergantung pada umur dari beton ataupun sifat dari agregat maupun semen, selain itu juga jenis dan ukuran benda uji memiliki pengaruh pada beton itu sendiri. Nilai modulus elastisitas dapat diperoleh dari pengujian menggunakan rumus 3.2. berikut.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3-2)$$

$$\sigma = \frac{P}{A_o} \quad (3-3)$$

$$\sigma = \frac{L-l_o}{l_o} = \frac{\Delta l}{l_o} \quad (3-4)$$

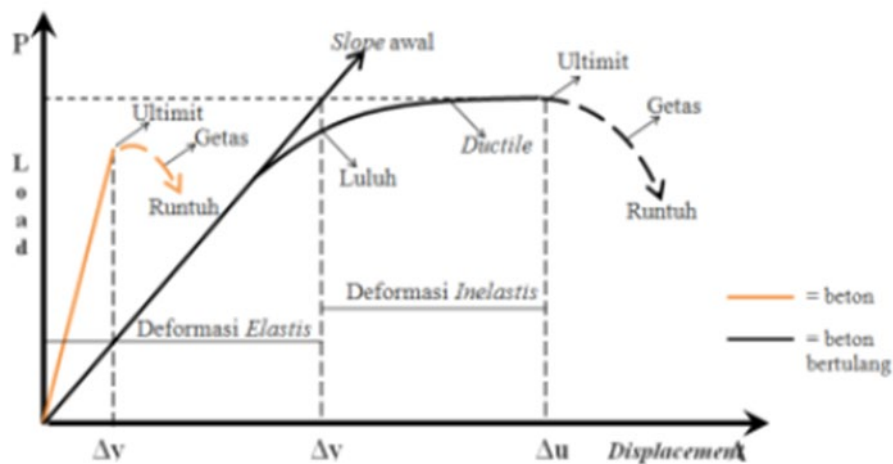
Keterangan :

E = Modulus elastisitas beton (MPa)
 σ = Tegangan beton maksimum (MPa)
 ϵ = Regangan beton
 P = Beban Tekan (N)
 A_o = Luas tampang beton (mm^2)
 L = Panjang ukur (yang memendek) semasa terjadi tegangan (mm)
 l_o = Panjang awal benda uji (mm)
 Δl = Perubahan panjang benda uji (mm)

3.4 Daktilitas

Daktilitas adalah suatu sifat yang sangat dipertimbangkan ketika sebuah struktur direncanakan sehingga menjadi standar kelayakan untuk mengontrol kerusakan pada struktur (Punmia, 2007).

Perilaku daktilitas dan getas pada beton dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Perilaku daktilitas dan getas pada beton Sumber : Punmia, B.C. at al, 200.

Lianasari, A. E dan Siahaan, R. P (2019) menggunakan persamaan dalam penelitiannya bahwa untuk menentukan daktilitas pada beton dilakukan dengan membandingkan defleksi saat leleh pertama dengan defleksi ultimit pada balok. Besaran nilai daktilitas pada balok (μ) dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (3-5)$$

Keterangan :

- μ = Displacement Ductility Factor
- Δu = Lendutan Ultimit (mm)
- Δy = Lendutan Sewaktu Leleh (mm)

Menurut R. Park dan T. Paulay (1975) dalam salah satu metodenya dalam menentukan daktilitas yang bernama metode Sawyer. Menghitung daktilitas seperti pada persamaan (3-5) diperlukan untuk menghitung lendutan sewaktu leleh yang di asumsikan bahwa momen sewaktu leleh adalah 0,85 dari momen ultimit (M_n).

3.5 Kekakuan (*stiffness*)

Kekakuan (*stiffness*) adalah kemampuan sebuah material atau bahan untuk menjadi kaku atau tidak elastis. Kekakuan juga memiliki fungsi agar menjaga bangunan tidak melewati batas kelendutan yang telah ditentukan saat perencanaan. Kekakuan pada balok dapat diartikan dengan hasil pembagian lendutan saat uji lentur terhadap beban, sehingga dapat dihitung dengan persamaan 3-6.

$$K = \frac{P}{\Delta} \quad (3-6)$$

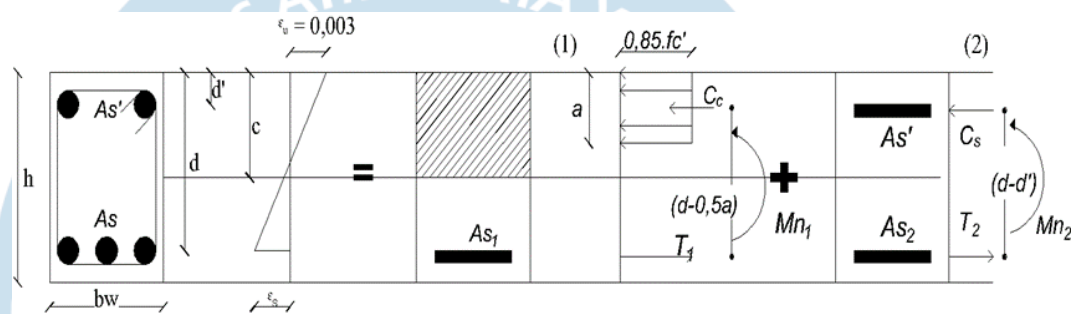
Keterangan :

K = Kekakuan (KN/mm)
 P = Beban (KN)
 Δ = Lendutan (mm)

Stiffness pada struktur juga dapat dipengaruhi oleh distribusi dari komponen struktur lainnya. Nilai *stiffness* yang kecil menjadikan material tersebut lebih mudah untuk ditekuk ataupun diubah kelendutannya sebaliknya apabila *stiffness* menjadi besar.

3.6 Balok Beton Bertulang Rangkap

Tulangan rangkap pada balok beton bertulang dapat diartikan bahwa balok tersebut terdapat tulangan tarik juga tulangan tekan. Penulangan rangkap pada balok dilakukan apabila terjadi kelebihan kapasitas momen yang dapat dipikul oleh balok dengan tulangan tunggal ketika perencanaan struktur. Analisis penampang balok dengan penulangan rangkap dapat ditinjau pada Gambar 3.2.



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

Pada penulangan rangkap terdapat 2 kondisi saat di analisis, sebagai berikut:

1. Tulangan tekan sesudah luluh.

Bila tulangan telah luluh maka $f_s' = f_y$

Gambar 3.2 (1) :

$$T_1 = A_{s1} \cdot f_y = C_c \quad (3-7)$$

$$M_{n1} = T_1 (d - 0,5a) \quad (3-8)$$

Gambar 3.2 (2)

$$C_s = A_{s'} \times f_y \quad (3-9)$$

$$M_{n2} = C_s (d - d') \quad (3-10)$$

Sehingga momen nominal dan ultimit pada balok tulangan rangkap adalah:

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} \quad (3-11)$$

$$M_u = \phi \cdot M_n \quad (3-12)$$

Tulangan tekan (A_s') dianggap leleh apabila $\epsilon_s' > \epsilon_y$, dengan $\epsilon_s' > \epsilon_y$ adalah:

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{f_y}{2.10^5} \quad (3-13)$$

$$\epsilon_s' = \frac{\epsilon_{cu} \cdot (c - d')}{c} = \frac{0,003 \cdot (c - d')}{c} \quad (3-14)$$

2. Tulangan tekan saat belum luluh

Kondisi tulangan tekan belum luluh apabila $\epsilon_s' < \epsilon_y$, dengan $\epsilon_s' < \epsilon_y$ adalah :

$$f_s' \neq f_y \quad (3-15)$$

$$f_s' = E_s \cdot \epsilon_s' \quad (3-16)$$

sehingga momen nominal dan momen ultimit pada balok penulangan rangkap adalah :

$$M_n = (A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_s') \cdot (d - 0,5a) + \{A_s' \cdot f_s' \cdot (d - d')\} \quad (3-17)$$

$$M_u = \phi \cdot M_n \quad (3-18)$$

Keterangan :

- M_n = Momen Nominal (Nmm)
- M_u = Momen Ultimate (Nmm)
- C_c = Gaya pada daerah tekan pada 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 Tekan Daerah 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) Mengacu pada SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.1 Dengan Asumsi Sebesar 0,003.
 E_s = Modulus Elastis Baja Non-Prategang Dengan Nilai Sebesar 200.000 MPa
 β_1 = Faktor Pembentuk Tegangan Beton Tekan Persegi Ekuivalen
 - $f'_c \leq 30$ MPa (300Kg/cm²) maka $\beta_1 = 0,85$
 - $f'_c \geq 30$ MPa (300Kg/cm²) maka $\beta_1 = 0,85 - 0,05((f'_c - 30)/7) \geq 0,65$
 - β_1 tidak boleh diambil dengan nilai kurang dari 0,8 ϕ = Faktor Reduksi diatur pada SNI 2847:2019 pasal 21.2.2.2, dengan memperhatikan regangan tarik netto (ε_t)
 - $\varepsilon_t \geq 0,005$ Penampang dominan tarik, $\phi = 0,9$.
 - $\varepsilon_t \leq 0,002$ Penampang dominan tekan dengan tulangan spiral, $\phi = 0,75$.
 - $\varepsilon_t \leq 0,002$ Penampang dominan tekan dengan tulangan non spiral, $\phi = 0,65$.
 - $0,002 < \varepsilon_t < 0,005$ Penampang dalam kondisi transisi, tulangan spiral $\phi = 0,75 + 0,15 \times \frac{\varepsilon_t - 0,002}{0,005 - 0,002}$.
 - $0,002 < \varepsilon_t < 0,005$ Penampang dalam kondisi transisi, tulangan non spiral $\phi = 0,65 + 0,25 \times \frac{\varepsilon_t - 0,002}{0,005 - 0,002}$.

3.7 Perancangan Kekuatan Geser Balok

Mc Cormac (2001) melakukan penelitian yang menyatakan keruntuhan geser pada balok bertulang adalah sangat berbeda jika dibandingkan dengan keruntuhan lentur. Keruntuhan geser dapat terjadi dengan sangat tiba – tiba baik dengan maupun tanpa peringatan.

Nawy (1998 : 162) menyatakan bahwa untuk menentukan besaran tegangan geser yang terjadi pada balok bertulang adalah berdasarkan nilai tegangan geser rerata nominal dengan persamaan 3.19 berikut.

$$v_u = \frac{V_u}{\phi b d} \quad (3-19)$$

Keterangan :

- V_u = Gaya Geser (kg)
- v_u = Tegangan Geser (Kg/cm²)
- b = Lebar Balok (cm)
- d = Tinggi Balok (cm)
- ϕ = Faktor Reduksi Kekuatan Bahan (bila geser 0,6)

Tulangan geser, V_s dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{s} \quad (3-20)$$

Keterangan :

- V_s = Gaya Geser Nominal yang Tersedia pada Sengkang (N)
- A_v = Luas Penampang Sengkang (mm²)
- f_y = Kuat Luluh Sengkang (MPa)
- d = Tinggi Efektif Penampang Balok (mm)
- s = Jarak antara Pusat ke Pusat tulangan geser menuju arah sejajar tulangan utama memanjang (mm)

Kekuatan geser menurut Cormac (2001 : 240), adalah kekuatan geser nominal (V_n) menjadi jumlah dari kekuatan yang diberikan oleh tulangan dan beton dengan persamaan 3.21 berikut.

$$V_n = V_c + V_s \quad (3-21)$$

Keterangan :

- V_n = Kekuatan Gaya Geser Nominal (KN)
- V_c = Kekuatan Geser yang disebabkan oleh Beton (KN)
- V_s = Kekuatan Geser yang disebabkan oleh Tegangan Geser (KN)

Kemampuan beton (tanpa tulangan geser), dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut

$$V_c = \left(\frac{1}{6} \sqrt{f'_c} \right) b d \quad (3-22)$$

Keterangan :

V_c = Kapasitas Geser Beton (N)

f'_c = Kuat Tekan Beton (MPa)

b = Lebar Balok (mm)

d = Tinggi Efektif Penampang Balok (mm)

3.8 Perancangan Kekuatan Lentur Balok

Menurut penelitian Nawy (1998), analisis lentur pada balok bertulang rangkap bergantung pada penentuan kuat nominal momen pada suatu penampang (M_n) terhadap nilai – nilai dari a , b , d , d' , A_{s1} , $A_{s'}$, f_c dan f_y yaitu sebagai berikut:

$$M_{n1} = A_{s1} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (3-23)$$

$$M_{n2} = A_{s'} \cdot f_y \cdot (d - d') \quad (3-24)$$

$$M_n = M_{n1} + M_{n2}$$

Tinggi blok tegangan beton ditentukan menggunakan persamaan :

$$a = \frac{A_{s'} \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \quad (3-25)$$

Letak Garis Netral :

$$C = \frac{a}{\beta} \quad (3-26)$$

Keterangan :

M_n = Momen Nominal Lentur (Kg.cm)

a = Tinggi Blok Tegangan Tulangan Tekan(mm²)

b = Lebar balok (mm)

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)

3.9 Lendutan Pada Balok Bertulang Rangkap

Nawy (1998), Menyatakan bahwa lendutan yang terjadi pada balok bertulang yang dibebani pada kedua titik pembebanan dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$\Delta_{ultimit} = 0,125 \times \varphi_u \times l^2, \text{ jika } (\rho - \rho' < 0.03) \quad (3-27)$$

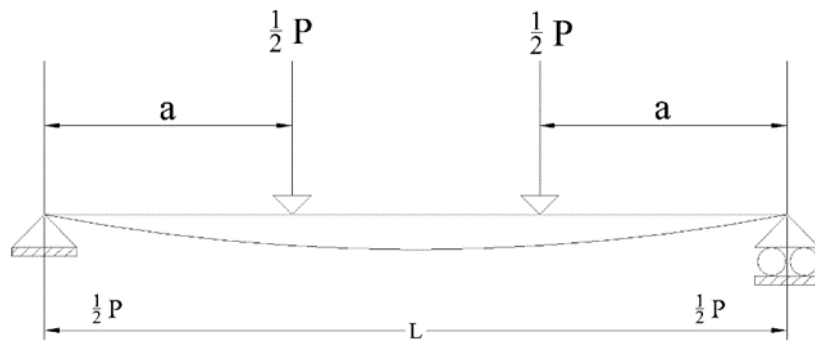
$$\varphi_u = 0,7 \frac{\varepsilon_u}{c} [100(\rho - \rho')]^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho - \rho'}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}, \text{ jika } (\rho - \rho' > 0.03) \quad (3-28)$$

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_u}{c} \quad (3-29)$$

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 ($\frac{A_s'}{b \cdot d}$)

Komponen struktur lentur harus direncanakan saat perancangan agar memiliki tingkat kekakuan yang cukup untuk membatasi tingkat lendutan atau deformasi yang dapat berpengaruh negatif pada kemampuan layan atau kinerja struktur beban kerja (SNI 2847:2019). Meskipun telah dilakukan *assesment*, struktur balok dapat menjadi tidak layak jika terlalu lentur. Maka menurut Spiegel dan Limbruner (1991) lendutan dapat ditinjau pada Gambar 3.3 yang disebabkan oleh beban terpusat.



Gambar 3.3 Lendutan pada Balok disebabkan oleh Beban Terpusat

Lendutan pada balok dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$EI\Delta = \frac{1}{2} \left(\frac{L}{2} \right) \left(\frac{P L}{2} \right) \left(\frac{2L}{3} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{L-2a}{2} \right) \times \left[- \left(\frac{P L}{2} - \frac{P}{2} a \right) \right] \left[a + \frac{2}{3} \left(\frac{L-2a}{2} \right) \right] \quad (3-30)$$

$$EI\Delta = \left(\frac{PL^2}{16} - \frac{P \cdot a^3}{12} \right) \quad (3-31)$$

$$\Delta = \frac{PL^3}{48EI} \left(\frac{3 \cdot a}{L} - \frac{4 \cdot a^3}{L^3} \right) \quad (3-32)$$

Keterangan :

- E = Modulus elastisitas beton (MPa)
- I = Momen inersia pada balok bertulang (mm⁴)
- Δ = Defleksi (mm)
- P = Beban luar (N)
- L = Panjang Bentang balok (mm)
- a = Jarak Beban Dari Tumpuan (mm)