

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Umum

Karakteristik dari beton harus dipertimbangkan dalam hubungannya dengan kualitas yang dituntut untuk suatu tujuan konstruksi tertentu. Kuat desak beton dipengaruhi oleh jenis dan kualitas semen, bentuk dan tekstur permukaan agregat, bahan campuran, perawatan, suhu, dan umur beton. Menurut **SK-SNI, (1993)**, untuk menghitung modulus elastisitas beton normal dipakai nilai $E_c = 4700 \sqrt{f'_c}$. Jika kuat desak beton (f'_c) makin meningkat maka modulus elastisitas beton (E_c) naik, semakin besar nilai E_c faktor kekakuan lentur komponen struktur (EI) akan makin meningkat dan semakin besar EI , kekakuan yang terjadi (k) akan naik sehingga kekuatan beton akan bertambah.

3.2 Beton Bertulang

Beton sederhana dibentuk oleh pengerasan campuran semen, air, agregat halus, agregat kasar, udara, dengan atau tanpa bahan campuran lainnya. Dalam adukan beton, air dan semen membentuk pasta semen yang mengisi pori-pori antar butiran-butiran agregat halus dan bersifat sebagai perekat/pengikat dalam proses pengerasan sehingga butiran-butiran agregat saling terikat dengan kuat

hingga terbentuk massa yang kompak/padat. Bahan yang terbentuk ini ,mempunyai kekuatan desak yang tinggi, dan ketahanan terhadap tarik rendah, atau kira-kira kuat tariknya 0,1 kali kekuatan terhadap desak. Oleh karena itu penguatan tarik dan geser harus diberikan pada daerah tarik dari penampang untuk mengatasi kelemahan pada daerah elemen beton bertulang sehingga jika beton dikombinasikan dengan baja tulangan maka akan menjadi elemen utama pada suatu sistem struktur.

3.3 Hubungan Silika dan Perubahan Mutu Semen Portland

Menurut **Kusnadi, (1985)**, komposisi silika untuk semen portland dibatasi dengan menentukan perbandingan “silica ratio” yang didekati dengan persamaan:

$$SR = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (3.1)$$

Dari Persamaan (3.1) tampak bahwa semakin tinggi kandungan silika dalam semen portland, makin besar nilai SR. Nilai SR dibatasi: $1,6 < SR < 3,5$ dengan nilai rata-rata 2,0-2,5.

Neville, (1973), mengatakan bahwa penggolongan jenis semen dapat dibedakan menurut komposisi mineral yang dihitung dalam persen berat terhadap semen portland. Pengurangan/penambahan salah satu unsur kimia semen seperti silika, akan mengubah prosentase senyawa kimia semen portland. Analisis kimia tersebut adalah sebagai berikut:

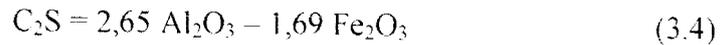
1. “Tricalcium silikat”, $3 CaO \cdot SiO_2$ atau C_3S

$$C_3S = 4,07 CaO - 7,60 SiO_2 - 6,72 Al_2O_3 - 1,43 Fe_2O_3 - 2,85 SO_3 \quad (3.2)$$

2. “Dicalcium silikat”, $2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ atau C_2S



3. “Tricalcium aluminat”, $3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ atau C_3A



4. “Tetracalciumaluminoferrit”, $4 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ atau C_4AF

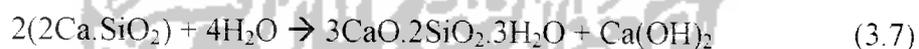


Dari persamaan-persamaan di atas akan didapatkan data prosentase senyawa kimia dari semen portland dan mengacu dari Tabel 2.2, jenis semen dapat diketahui, yaitu jenis I, jenis II, jenis III, jenis IV, atau jenis V.

3.4 Tinjauan Tepung Kaca sebagai “Puzzolan”

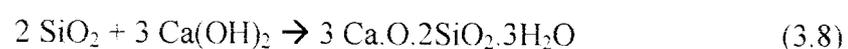
Dari hasil pengujian yang dilakukan oleh Balai Teknik Kesehatan Lingkungan Yogyakarta (BTKL), pecahan botol kaca didominasi oleh silika, SiO_2 sebesar 71,9 %, sehingga bahan ini termasuk “puzzolan”.

Menurut **Kardiyono, (1989)**, reaksi hidrasi semen terjadi ketika semen bersentuhan dengan air, reaksinya adalah sebagai berikut:



Persamaan (3.6) dan (3.7) menghasilkan gel, $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ atau $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ dan sisa reaksinya adalah kapur bebas, $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Jika tepung kaca yang mengandung 71,9% silika, SiO_2 , dimasukkan dalam adukan beton, maka terjadi reaksi sebagai berikut:



Persamaan (3.8) menghasilkan gel, $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ atau $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ sehingga penambahan tepung kaca mengakibatkan peningkatan jumlah gel dalam adukan beton.

Menurut **Popovic, (1998)**, luas permukaan gel didekati dengan ukuran “gel-space ratio” (X_F) yang dapat dihitung dengan rumus:

$$X_F = \frac{V_g}{V_w + V_a + V_p} \quad (3.9)$$

Dari Persamaan (3.9) tampak bahwa semakin besar jumlah gel yang terbentuk maka “gel space ratio” makin besar. Hubungan antara “gel space ratio” dan kuat desak beton dihitung dengan rumus:

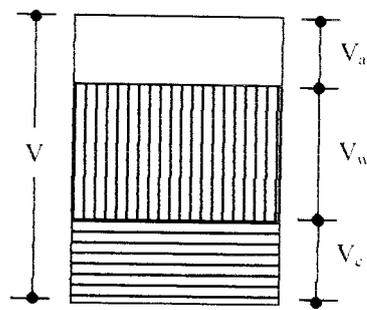
$$f_c' = 29000 \cdot X_F^3 \quad (3.10)$$

Dari Persamaan (3.10) tampak bahwa “gel-space ratio” (X_F) merupakan fungsi pangkat tiga dari kuat desak beton (f_c') sehingga semakin besar “gel-space ratio” (X_F), makin besar kuat desak beton (f_c').

3.5 Tinjauan Tepung Kaca sebagai Bahan Pengisi (“filler”)

Bahan pengisi (“filler”) yang digunakan dalam penelitian ini adalah pecahan kaca yang ditumbuk dan digiling menjadi butiran halus dengan ukuran 75 – 150 μm sehingga bahan ini diharapkan dapat mengisi/mengurangi porositas yang terjadi pada adukan beton.

Menurut **Popovic, (1998)**, porositas terbentuk pada saat hidrasi semen berlangsung. Komposisi volume udara, air, dan semen pada saat hidrasi semen dapat digambarkan seperti tampak pada Gambar 3.1.

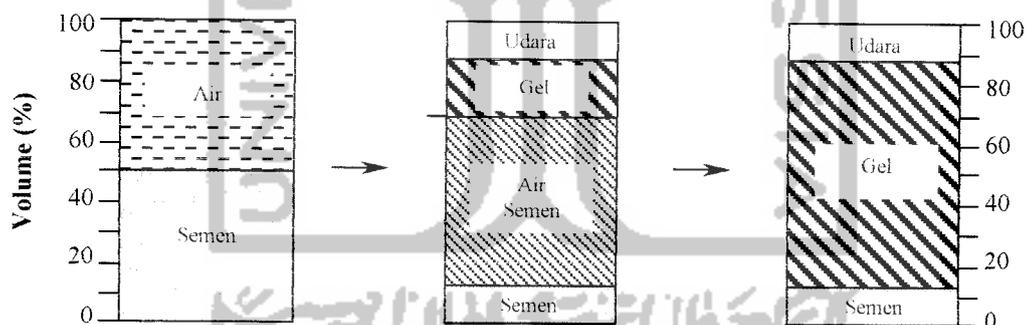


Gambar 3.1 Skema Komposisi Pasta Semen

Dari Gambar 3.1 hubungan antara volume pasta semen (V), volume udara (V_a), volume air (V_w), dan volume semen (V_c) dapat didekati dengan persamaan:

$$V = V_a + V_w + V_c \quad (3.12)$$

Proses pembentukan porositas pada saat hidrasi semen dapat digambarkan seperti tampak pada Gambar 3.2

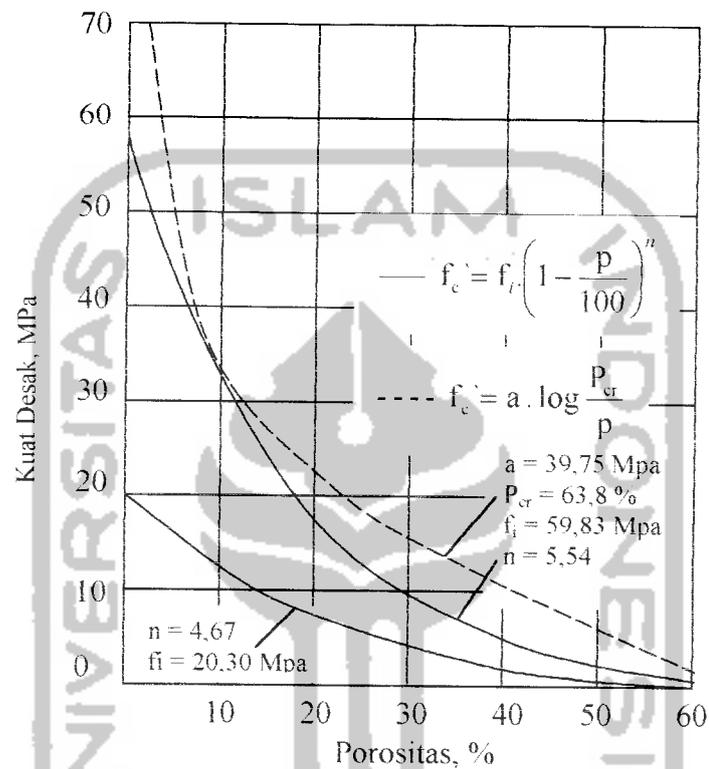


Gambar 3.2 Skema Hidrasi Semen

Dari Gambar 3.2 pada saat hidrasi semen berlangsung, proses pencampuran antara air dan semen menghasilkan gel yang diikuti dengan naiknya air semen ke permukaan (“bleeding”) melalui pori kapiler. Jumlah pori kapiler yang terbentuk dalam hidrasi semen dihitung dalam persen yang didekati dengan persamaan:

$$p = \frac{V_w + V_a + V_p - V_g}{V} \quad (3.13)$$

Porositas merupakan fungsi dari kuat desak beton, hubungan dua parameter tersebut dapat digambarkan dalam bentuk kurva seperti tampak pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Hubungan Kuat Desak dan Porositas

Mengacu dari Gambar 3.3 hubungan kuat desak beton dan porositas didekati dengan persamaan:

$$f'_c = f_i \left(1 - \frac{p}{100}\right)^n \quad (3.14)$$

dan

$$f'_c = a \log \frac{p_{cr}}{p} \quad (3.15)$$

Dari Persamaan (3.13) dan (3.14) tampak bahwa semakin besar porositas (p), kuat desak beton (f_c') makin berkurang. Oleh karena itu untuk memperoleh kualitas beton yang baik, pori pada beton harus dikurangi dengan memberikan bahan pengisi (“filler”) yang berukuran sangat kecil.

3.6 Kuat Desak Beton

Menurut Peraturan Beton Bertulang Indonesia, (1971), dengan menganggap nilai-nilai dari hasil pemeriksaan benda uji menyebar normal (mengikuti lengkung dari Gauss) dan hanya 5 % benda uji yang mengalami penyimpangan maka kekuatan beton karakteristik (σ'_{bk}) dapat dihitung dengan rumus:

$$\sigma'_{bk} = \sigma'_{bm} - 1,64 s \quad (3.16)$$

Dari Persamaan (3.16) σ'_{bm} merupakan kuat desak beton rata-rata benda uji yang dihitung dengan rumus:

$$\sigma'_{bm} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma'_{b_i}}{N} \quad (3.17)$$

Mengacu dari persamaan (3.16) standar deviasi (s) dapat didekati dengan rumus:

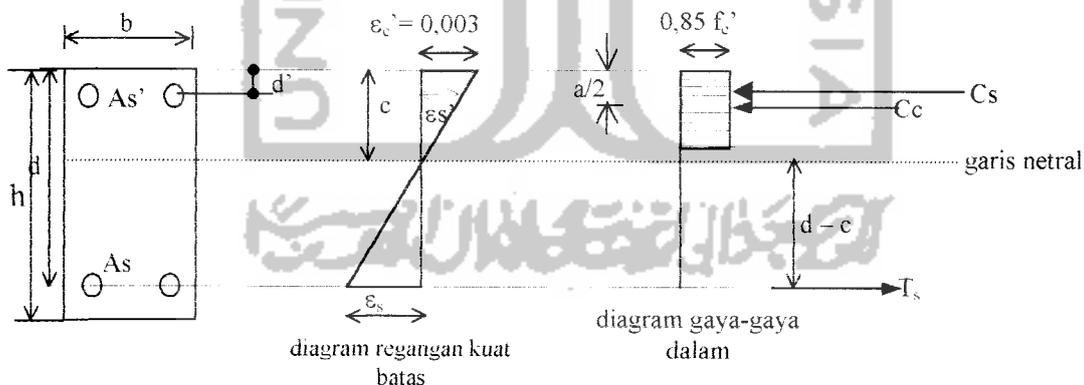
$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\sigma'_{b_i} - \sigma'_{bm})^2}{N-1}} \quad (3.18)$$

Dari Persamaan (3.18) tampak bahwa semakin besar standar deviasi maka kekuatan beton karakteristik makin kecil.

3.7 Momen Lentur Balok Normal

Menurut **Istimawan, (1994)**, pendekatan dan pengembangan perencanaan didasarkan atas anggapan-anggapan sebagai berikut:

1. nilai regangan dalam penampang komponen struktur sebanding lurus dengan jarak ke garis netral,
2. tegangan sebanding dengan regangan hanya sampai sekitar beban sedang, tegangan beton desak adalah $\pm \frac{1}{2} f_c'$. Jika beban meningkat hingga ultimit maka tegangan regangannya terdistribusi tidak linier lagi, membentuk garis lengkung di mulai dari garis netral hingga serat desak terluar,
3. untuk memperhitungkan kapasitas momen ultimit komponen struktur, kuat tarik beton diabaikan dan seluruh tarik ditahan tulangan baja tarik, dan
4. tegangan tulangan baja desak (f_c') merupakan fungsi dari regangannya tepat pada titik berat tulangan baja desak.



Gambar 3.4 Distribusi Regangan dan Tegangan Lentur Balok Beton Bertulang

Untuk alasan praktis maka hubungan antara distribusi tegangan desak dan regangan dari beton pada saat tercapai kekuatan normal dapat diambil sebagai distribusi tegangan persegi ekuivalen, dengan intensitas tegangan beton yang merata sebesar $0,85 \cdot f_c$ setinggi $a = \beta_1 \cdot c$ dari syarat desak maksimum. Harga β_1 diberikan oleh rumus sebagai berikut:

Untuk $f_c < 30$ MPa maka:

$$\beta_1 = 0,85 \quad (3.19)$$

Untuk $f_c > 30$ MPa maka:

$$\beta_1 = 0,85 - 0,008(f_c - 30) \geq 0,65 \quad (3.20)$$

Dari Gambar 3.4 periksa regangan tulangan baja desak dan baja tarik:

$$\epsilon_s' = \frac{c - d'}{c} (0,003) \quad (3.21)$$

$$\epsilon_s = \frac{d - c}{c} (0,003) \quad (3.22)$$

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \quad (3.23)$$

Ada dua anggapan:

- a) jika tulangan baja desak (A_s') telah leleh sebelum beton mencapai regangan 0,003 atau $\epsilon_s' \geq \epsilon_y$ maka:

nilai a dihitung dengan rumus:

$$a = \frac{A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c \cdot b} \quad (3.24)$$

letak garis netral adalah:

$$c = \frac{a}{\beta_1} \quad (3.25)$$

b) jika tulangan baja desak (A_s') belum leleh pada saat beton mencapai regangan desak 0,003 atau $\epsilon_s' \leq \epsilon_y$ dan $\epsilon_s \geq \epsilon_y$ maka:

letak garis netral (c) didekati dengan persamaan:

$$0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot \beta_1^2 + (600A_s' - A_s \cdot f_y) \cdot c - 600 d' \cdot A_s' = 0 \quad (3.26)$$

tegangan tulangan baja desak (f_s') dicari dengan rumus:

$$f_s' = \frac{c - d'}{c} (600) \quad (3.27)$$

tinggi blok tegangan desak (a) dihitung dengan persamaan:

$$a = \beta_1 c \quad (3.28)$$

Mengacu dari Gambar 3.4 gaya desak yang terjadi adalah:

$$C_c = 0,85 \cdot f_c' \cdot a \cdot b \quad (3.29)$$

Untuk kondisi I:

$$C_s = A_s' \cdot f_y \quad (3.30)$$

Untuk kondisi II:

$$C_s = A_s' \cdot f_s' \quad (3.31)$$

Gaya tarik dihitung dengan rumus:

$$T_s = A_s \cdot f_y \quad (3.32)$$

Keseimbangan gaya-gaya dalam adalah:

$$C_c + C_s - T_s = 0 \quad (3.33)$$

Kekuatan momen lentur nominal dapat dihitung dengan rumus:

$$M_n = C_c \left(d - \frac{1}{2} a \right) + C_s \cdot (d - d') \quad (3.34)$$

atau

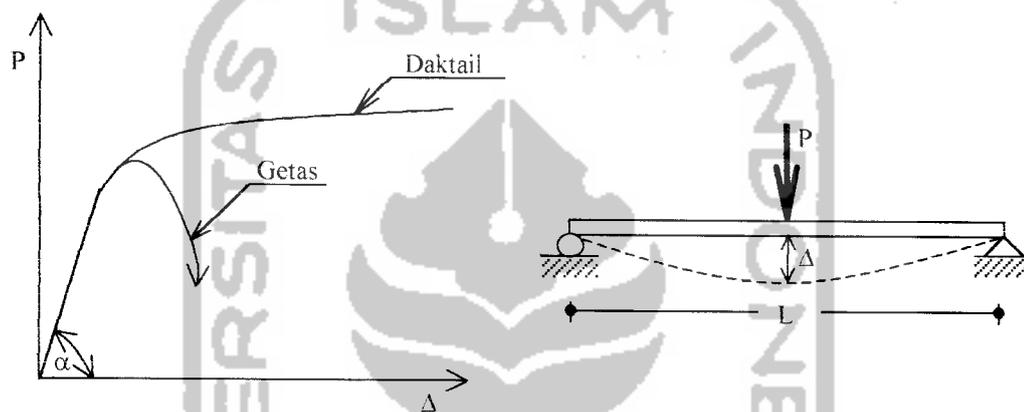
$$M_n = T_s \left(d - \frac{1}{2} a \right) + C_s \cdot \left(\frac{1}{2} a - d' \right) \quad (3.35)$$

Kekuatan momen lentur ultimit dapat dihitung dengan rumus:

$$M_u = \Phi \cdot M_n \quad (3.36)$$

3.8 Hubungan Beban dan Lendutan

Menurut **Park dan Paulay, (1975)**, jika suatu balok menerima beban (P) maka akan mengakibatkan terjadi lendutan (Δ). Struktur balok beton bertulang mengalami 2 fase yaitu fase linier dan fase plastis.



Gambar 3.5 Hubungan Beban dan Lendutan

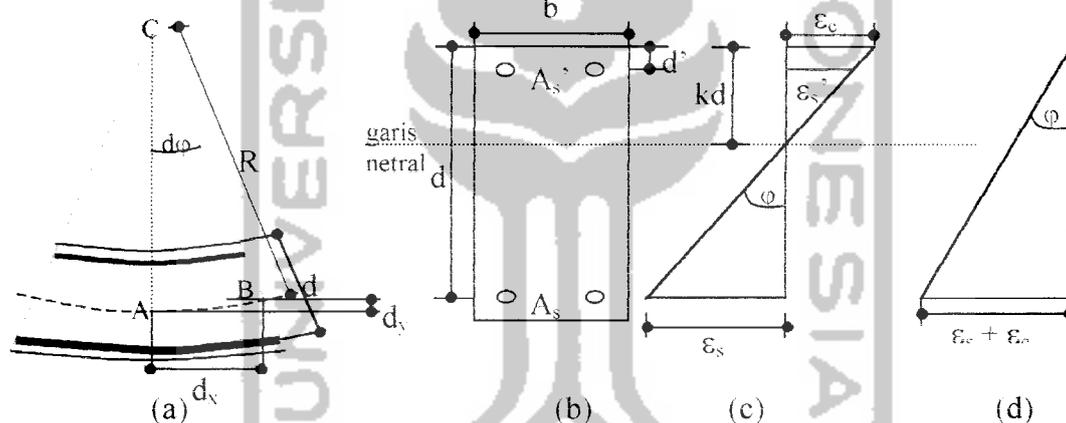
Dari Gambar 3.5 tampak bahwa semakin besar beban yang bekerja pada balok beton bertulang, lendutan yang terjadi makin besar sehingga balok akan mengalami “daktail”, dan jika beban bekerja pada balok tanpa tulangan maka struktur akan mengalami getas, sehingga kekakuan balok (k) dapat dihitung dengan rumus:

$$k = \text{tg } \alpha = \frac{P}{\Delta} \quad (3.37)$$

3.9 Hubungan Momen dan Kelengkungan

Menurut **Park dan Pauley, (1975)**, kelengkungan terjadi saat balok mengalami retak karena dibebani gaya aksial yang bekerja. Adanya retak pada beton menunjukkan terjadinya penambahan tegangan pada balok sehingga merubah jari-jari kelengkungan (R), tinggi garis netral (c), regangan beton (ϵ_c) dan regangan baja tarik (ϵ_s). Hubungan ketiga parameter tersebut dapat di dekati dengan rumus:

$$\frac{1}{R} = \frac{\epsilon_c}{kd} = \frac{\epsilon_s}{d(1-k)} \quad (3.38)$$



Gambar 3.6 Kelengkungan Balok Beton Bertulang

Untuk mencari kelengkungan (ϕ) dapat dilakukan dengan memasang alat “strain gauge” pada daerah regangan beton dan regangan baja. Mengacu dari Gambar 3.6 (c), dengan menggeser daerah regangan baja (ϵ_s) ke kanan sejauh ϵ_c dengan tinggi (d) konstan, maka sesuai dengan Gambar 3.6 (d) kelengkungan (ϕ) dapat dihitung dengan rumus:

$$\phi = \frac{\epsilon_c + \epsilon_s}{d} \quad (3.39)$$

Pengujian kuat lentur dengan “strain gauge” sangat praktis, tetapi dari segi ekonomis biayanya sangat mahal sehingga untuk mencari kelengkungan digunakan cara lain yaitu dengan menggunakan metode numeris “central difference”.

Mengacu dari Gambar 3.6 (a) ordinat garis elastis (AB) dapat didekati dengan persamaan:

$$AB = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} = d_x \sqrt{1 + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2} = R \cdot d\varphi \quad (3.40)$$

Dari Persamaan (3.40) jari-jari kelengkungan dapat dihitung dengan rumus:

$$R = \frac{AB}{d\varphi} = \frac{AB}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{d\varphi} \quad (3.41)$$

dengan ketentuan bahwa:

$$\frac{d\varphi}{d\varphi} = \sec^2 \varphi = 1 + \operatorname{tg}^2 \varphi = 1 + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2 \quad (3.42)$$

Jika Persamaan (3.42) disubstitusikan ke Persamaan (3.41) maka:

$$R = \frac{d_x \sqrt{1 + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2}}{d\varphi} \left\{ 1 + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2 \right\} \quad (3.43)$$

Persamaan (3.43) dapat ditulis menjadi:

$$\frac{1}{R} = \frac{d\varphi}{d_x} \left\{ 1 + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2 \right\}^{-3/2} \quad (3.44)$$

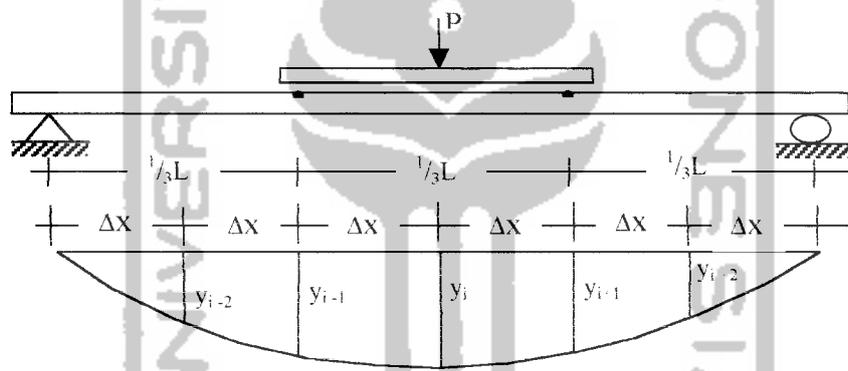
Persamaan (3.44) disederhanakan sehingga diperoleh:

$$\frac{1}{R} = \frac{d_y^2}{d_x^2} \left\{ 1 + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2 \right\}^{-3/2} \quad (3.45)$$

mengingat bahwa $\sqrt{1 + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2} = R \cdot \frac{d\varphi}{d_x}$ dan karena ordinat-ordinat garis elastis sangat kecil, dianggap $\frac{d_y}{d_x} \approx 0$ sehingga kelengkungan (φ) merupakan $\frac{1}{R}$ maka:

$$\varphi = \frac{1}{R} = \frac{d^2_y}{d_x^2} \quad (3.46)$$

Metode numeris “central difference” adalah suatu cara pendekatan untuk mendapatkan besarnya lendutan balok akibat pembebanan statis yang diperoleh dengan mengukur lendutan 3 titik secara berurutan pada jarak $1/3$ bentang (L) seperti tampak pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Lendutan balok

Mengacu dari Gambar 3.7, hubungan antara mode “displacement” (y) dengan panjang elemen (Δ_x) dapat didekati dengan rumus:

$$\frac{d_y}{d_x} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta_x} \quad (3.47)$$

Jika persamaan (3.47) diturunkan maka didapat persamaan:

$$\frac{d^2_y}{d_x^2} = \frac{\frac{d_y}{d_x} \cdot (y_{i+1} - y_{i-1}) \cdot 2\Delta_x - \frac{d_y}{d_x} \cdot (y_{i+1} - y_{i-1})}{(2\Delta_x)^2} \quad (3.48)$$

karena Δ_x nilainya konstan, maka $\frac{d_y}{d_x}(y_{i+1} - y_{i-1}) \approx 0$, sehingga:

$$\frac{d_y^2}{d_x^2} = \frac{d_y}{d_x} \frac{(y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}) \cdot 2\Delta_x}{(2\Delta_x)^2} \quad (3.49)$$

Persamaan (3.49) dapat disederhanakan menjadi:

$$\frac{d_y^2}{d_x^2} = \frac{\left(\frac{y_{i+1} - y_i}{2\Delta_x}\right) - \left(\frac{y_i - y_{i-1}}{2\Delta_x}\right)}{(2\Delta_x)^2} \quad (3.50)$$

atau:

$$\frac{d_y^2}{d_x^2} = \frac{(y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1})}{(2\Delta_x)^2} \quad (3.51)$$

Dari substitusi Persamaan (3.51) ke Persamaan (3.46) diperoleh:

$$\varphi = \frac{d_y^2}{d_x^2} = \frac{(y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1})}{(2\Delta_x)^2} \quad (3.52)$$

Mengacu dari Gambar 3.7 momen (M) yang terjadi pada bentang (L) karena adanya beban (P) dapat diketahui dengan rumus:

$$M = \frac{1}{6} PL \quad (3.53)$$

Dari Persamaan (3.52) dan (3.53), faktor kekakuan untuk balok beton bertulang dapat didekati dengan persamaan:

$$EI = \frac{M}{\varphi} \quad (3.54)$$

Menurut **Park dan Pauley, (1975)**, hubungan momen dan kelengkungan dinyatakan dalam tiga bagian, yaitu:

a. momen-kelengkungan sebelum retak

Momen dan kelengkungan didekati dengan rumus:

$$M_{cr} = \frac{f_r \cdot I}{\bar{y}} \quad (3.55)$$

$$\phi_{cr} = \frac{f_r}{E_c \cdot \bar{y}} \quad (3.56)$$

b. momen-kelengkungan setelah retak pada saat leleh pertama

Momen dan kelengkungan yang terjadi pada balok yang terjadi adalah:

$$M_y = A_s \cdot f_y \cdot jd \quad (3.57)$$

$$\phi_y = \frac{(f_y \cdot E_s)}{d(1-k)} \quad (3.58)$$

c. momen-kelengkungan saat beban ultimit

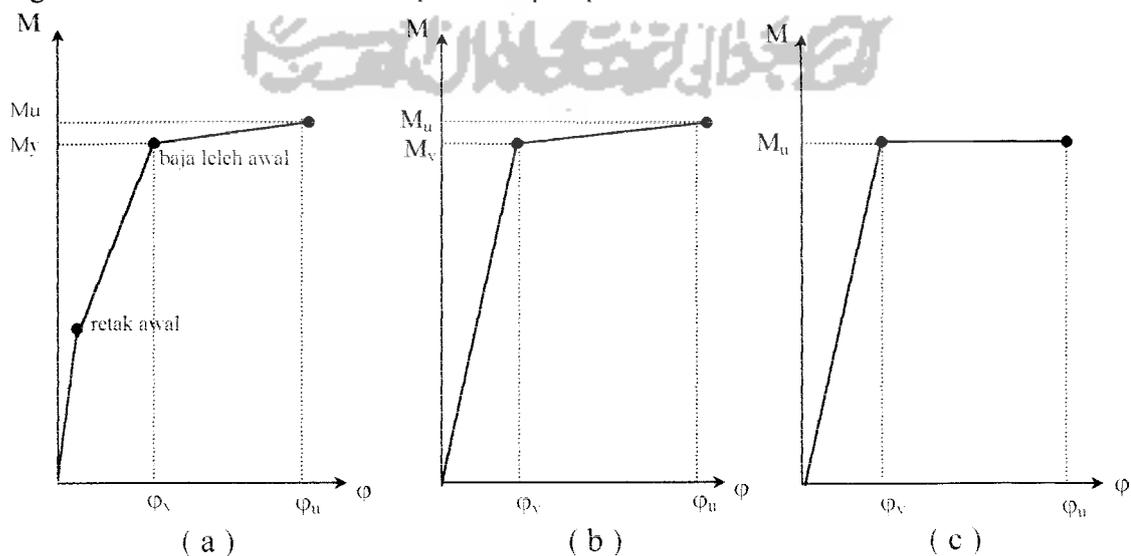
Momen dan kelengkungan di tunjukkan dalam persamaan berikut:

$$M_u = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \quad (3.59)$$

$$\phi_u = \frac{\epsilon_c \cdot \beta_1}{a} \quad (3.60)$$

Hubungan M- ϕ ideal pada balok beton bertulang dapat digambarkan dengan

grafik trilinear dan bilinear seperti tampak pada Gambar 3.8.



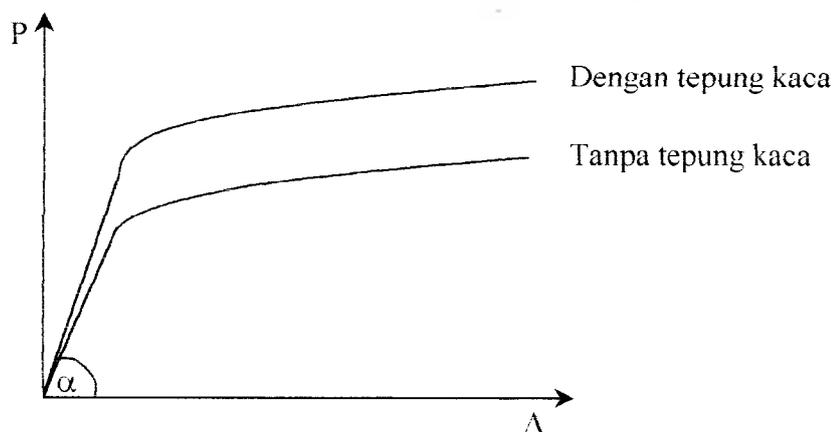
Gambar 3.8 Kurva Momen-Kelengkungan Ideal

Mengacu dari Gambar 3.8 (a), garis pertama menunjukkan retak awal, kedua adalah tegangan leleh baja dan ketiga merupakan regangan ultimit dari beton sehingga grafik ini disebut grafik trilinear. Gambar 3.8 (c) merupakan grafik bilinear yang merupakan hasil pendekatan dari Gambar 3.8 (b) karena saat hubungan $M-\phi$ terjadi dari beban 0 kN hingga baja leleh, garis pertama dan kedua hampir linier sehingga grafik hubungan $M-\phi$ digambarkan dalam bentuk bilinear.

3.10 Hipotesis

Dengan memperhatikan latar belakang, tujuan penelitian, tinjauan pustaka dan landasan teori, maka dapat dikemukakan hipotesis sebagai berikut:

- Penambahan tepung kaca dengan prosentase silika 10 % dari berat semen akan menghasilkan kuat desak dan kuat lentur balok beton maksimum.
- Penambahan tepung kaca akan meningkatkan kuat desak (f'_c) yang diikuti dengan naiknya modulus elastisitas beton (E_c), semakin besar nilai E_c , faktor kekakuan lentur komponen struktur (EI) akan makin meningkat dan semakin besar EI , kekakuan yang terjadi (k) akan naik sehingga kekuatan beton akan bertambah.



Gambar 3.9 Diagram $P - \Delta$ dari Pengujian Kuat Lentur