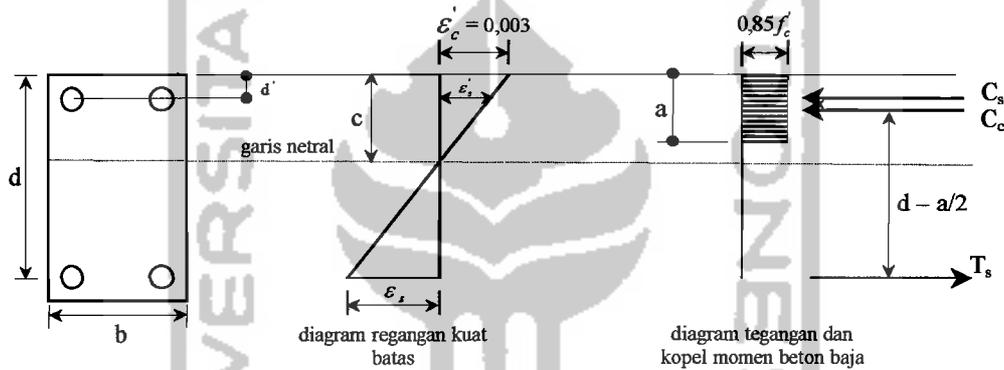


BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Kapasitas Lentur Balok Persegi Tulangan Rangkap

Park dan Paulay (1975) mengemukakan analisis momen kapasitas balok tulangan rangkap dengan mengacu pada Gambar 3.1 adalah sebagai berikut :



Gambar 3.1 Blok tegangan ekuivalen whitney tulangan rangkap

Ada dua kemungkinan yang akan dialami oleh penampang balok tulangan rangkap :

- a. Apabila $\epsilon'_s \geq \epsilon_y$ dan $\epsilon_s \geq \epsilon_y$, maka baja tekan dan tarik telah leleh.
- b. Apabila $\epsilon'_s < \epsilon_y < \epsilon_s$, maka baja tarik telah leleh, tetapi baja tekan belum leleh.

dengan : ϵ'_s = regangan baja tekan, ϵ_s = regangan baja tarik,

ϵ_y = regangan leleh baja

1. Kemungkinan a

Menganggap semua tulangan telah leleh, sehingga gaya-gaya dalam dari gambar 3.1 dihitung dengan rumus :

$$C_c = 0,85 f'_c \cdot a \cdot b \dots\dots\dots(3.1)$$

$$C_s = A'_s \cdot f_y \dots\dots\dots(3.2)$$

$$T_s = A_s \cdot f_y \dots\dots\dots(3.3)$$

dengan : C_c = gaya tekan pada beton, C_s = gaya tekan pada baja,

T_s = gaya tarik pada baja, f'_c = kuat tekan beton,

a = tinggi blok tegangan, b = lebar balok, A'_s = luas baja desak,

f_y = tegangan leleh baja, A_s = luas baja tarik

Persamaan keseimbangan didapat :

$$C_c + C_s = T_s \dots\dots\dots(3.4)$$

$$0,85 f'_c \cdot a \cdot b + A'_s \cdot f_y = A_s \cdot f_y \dots\dots\dots(3.5)$$

sehingga dari persamaan 3.5 didapat nilai a :

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0,85 f'_c \cdot b} \dots\dots\dots(3.6)$$

sehingga momen nominal untuk tulangan rangkap dapat dihitung dengan persamaan :

$$M_n = (A_s - A'_s) f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s \cdot f_y \cdot (d - d') \dots\dots\dots(3.7)$$

dengan : M_n = momen nominal, d = tinggi efektif balok,

d' = jarak dari tepi serat tertekan ke pusat tulangan tekan

2. Kemungkinan b

Apabila $\varepsilon_s' < \varepsilon_y < \varepsilon_s$, baja tekan belum leleh maka dicari nilai a dari persamaan keseimbangan dan diagram tegangan pada Gambar 3.1 sehingga didapat nilai a :

$$(0,85 f_c' \cdot b) \cdot a^2 + (600 \cdot A_s' - A_s \cdot f_y) \cdot a - (600 \cdot 0,85 \cdot d' \cdot A_s') = 0 \quad \dots\dots (3.8)$$

nilai dari tegangan baja tekan dicari dengan persamaan :

$$f_s' = \varepsilon_s' \cdot E_s = 0,003 \cdot \frac{a - \beta_1 \cdot d'}{a} \cdot E_s \quad \dots\dots (3.9)$$

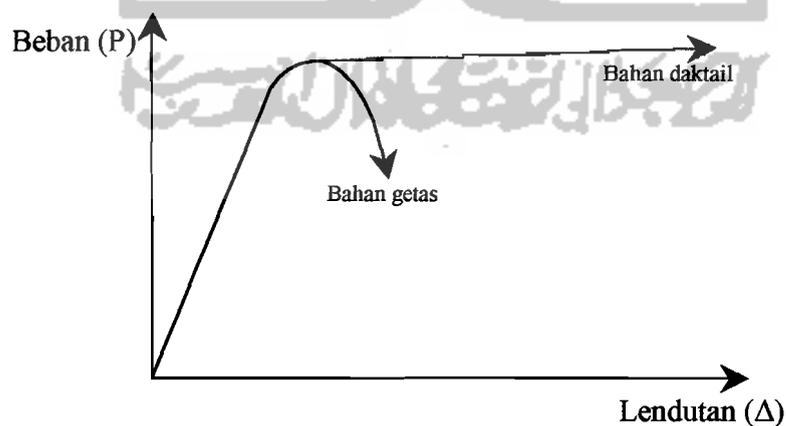
dengan : f_s' = tegangan baja tekan, β_1 = konstanta yang merupakan fungsi dari kelas kuat beton.

maka momen nominal dapat dicari dengan persamaan :

$$M_n = 0,85 f_c' \cdot a \cdot b \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' \cdot f_s' \cdot (d - d') \quad \dots\dots (3.10)$$

3.2 Hubungan Beban dan Lendutan

Park dan Paulay (1975) mengemukakan hubungan beban dan lendutan akibat beban seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Hubungan beban dan lendutan

Dari hubungan antara kekuatan (P) dan lendutan (Δ) pada Gambar 3.2, didapat kekakuan balok (k), sebagai berikut :

$$k = \frac{P}{\Delta} \dots\dots\dots(3.11)$$

3.3 Momen dan Kelengkungan

3.3.1 Kelengkungan balok

Kerusakan balok dapat dideteksi dengan perubahan kelengkungan.

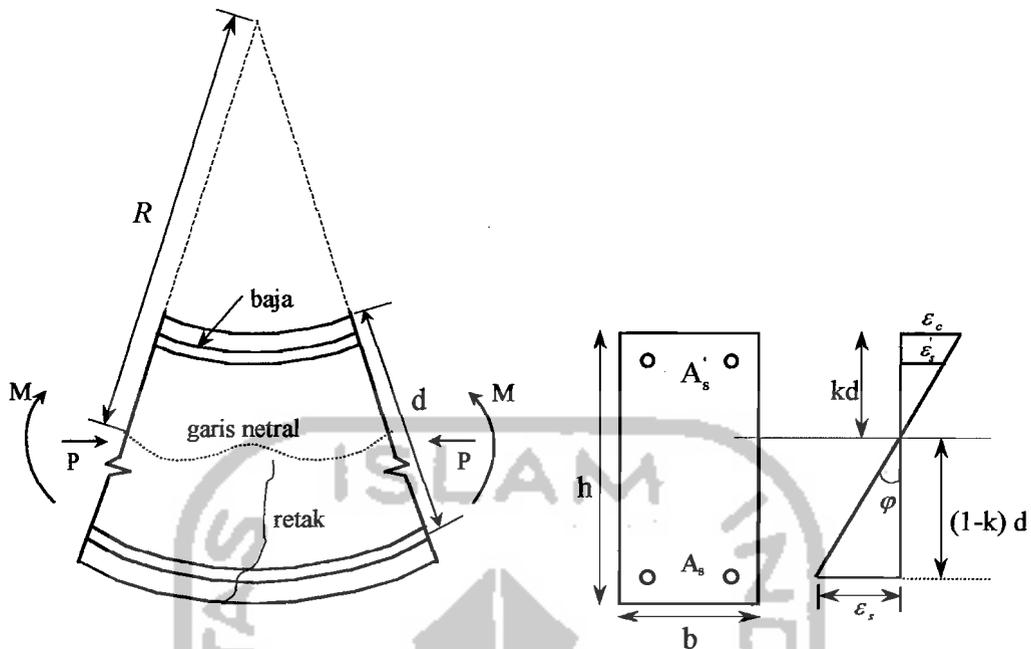
Kelengkungan balok menurut E.P.Popov (1984), adalah :

$$\frac{1}{R} = \varphi = \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \dots\dots\dots(3.12)$$

Kemiringan $\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 \approx 0$ sehingga kelengkungan didekati dengan persamaan :

$$\varphi = \frac{d^2 y}{dx^2} \dots\dots\dots(3.13)$$

Park dan Paulay (1975) mengemukakan, kelengkungan balok didapat dengan mengambil sebuah elemen lurus dari sebuah balok beton bertulang dengan momen-momen ujung dan gaya aksial yang sama seperti Gambar 3.3. Jari-jari kelengkungan (R) diukur dari garis netral. Retak-retak pada beton akibat penambahan tegangan akan merubah jari-jari kelengkungan (R), tinggi netral (k_d), regangan beton (ε_c) dan regangan tarik baja (ε_s). Berdasar teori tersebut, retak beton akibat kebakaran akan bertambah jika dilakukan penambahan beban.



Gambar 3.3 Kelengkungan balok

Menganggap sebuah elemen kecil dengan panjang dx dari balok dan menggunakan notasi seperti pada Gambar 3.3 maka rotasi diantara ujung-ujung dari elemen diberikan oleh :

$$\frac{dx}{R} = \frac{\epsilon_c \cdot dx}{k \cdot d} = \frac{\epsilon_s \cdot dx}{d \cdot (1-k)} \dots \dots \dots (3.14)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{\epsilon_c}{k \cdot d} = \frac{\epsilon_s}{d \cdot (1-k)} \dots \dots \dots (3.15)$$

dengan : $\frac{1}{R} = \varphi$

dari Gambar 3.3 jika regangan dijumlahkan diperoleh :

$$\varphi = \frac{\epsilon_c}{k \cdot d} = \frac{\epsilon_s}{d \cdot (1-k)} = \frac{\epsilon_c + \epsilon_s}{d} \dots \dots \dots (3.16)$$

dengan : φ = kelengkungan, ϵ_c = regangan beton

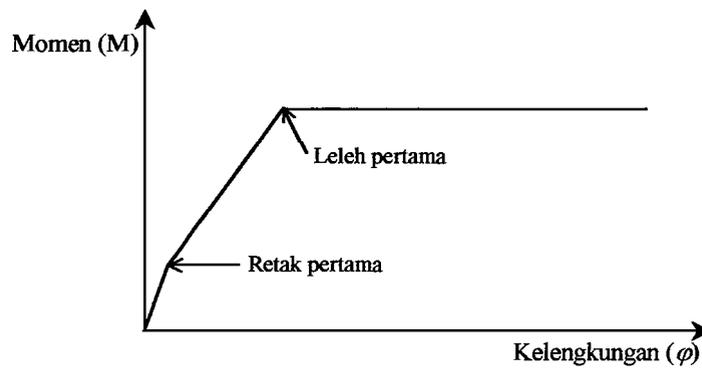
ϵ_s = regangan baja, d = tinggi efektif penampang

Dari Persamaan 3.16 diatas dapat dilihat bahwa untuk memperoleh kelengkungan (ϕ) diperlukan data regangan pada balok beton dan baja dengan cara memberikan *strain gauge*, dimana kemudian kelengkungan (ϕ) diperoleh dari hasil membandingkan jumlah regangan beton dan baja ($\varepsilon_c + \varepsilon_s$) dengan tinggi efektif balok (d).

Ini menunjukkan bahwa kelengkungan (ϕ) adalah gradien dari regangan elemen seperti dalam Gambar 3.3. Kelengkungan akan benar-benar berubah sepanjang bentang balok karena naik-turunnya garis netral dan regangan-regangan di antara retak-retak. Jika panjang elemen adalah kecil dan sebuah retak berakhir, kelengkungan dihitung dengan Persamaan 3.16 untuk penampang ijin yang diperoleh dari hubungan momen dan kelengkungan. Dua grafik yang diperoleh dari perhitungan balok bertulangan sebelah adalah lurus/linear diawal dan hubungan antara momen dan kelengkungan diberikan oleh persamaan :

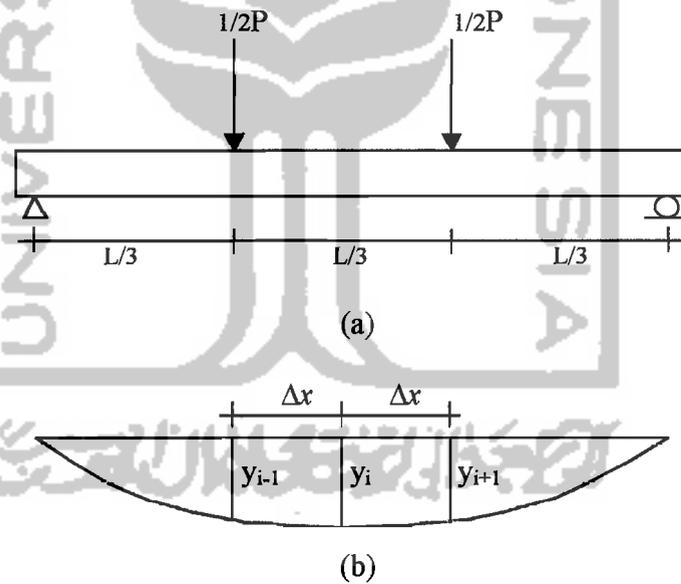
$$EI = MR = \frac{M}{\phi} \dots\dots\dots(3.17)$$

dengan EI adalah faktor kekakuan dari penampang. Peningkatan momen, retak pada beton mengurangi faktor kekakuan penampang. Perilaku penampang setelah retak bergantung dari jumlah tulangan pokok. Balok bertulangan sedikit menghasilkan sebuah kurva linear $M-\phi$ diatas titik leleh baja. Ketika baja leleh, terjadi peningkatan kelengkungan yang besar pada momen hampir konstan, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Hubungan momen dan kelengkungan

Menurut Chapra dan Canale (1989), pada suatu potongan balok kelengkungan dapat ditentukan dengan pendekatan metode *central difference* dengan memanfaatkan tiga titik diskrit yang berurutan. Mengacu pada Gambar 3.5 dan Deret Taylor.



Gambar 3.5 Lendutan akibat beban

$$f(y_{i+1}) = f(y_i) + f'(y_i)\Delta x + \frac{f''(y_i)}{2} \cdot \Delta x^2 + \dots \dots \dots (3.18)$$

Untuk mendapatkan turunan kedua digunakan $f(y_{i+2})$ sehingga Deret Taylor adalah sebagai berikut :

$$f(y_{i+2}) = f(y_i) + f'(y_i) \cdot 2\Delta x + \frac{f''(y_i)}{2} \cdot (2\Delta x)^2 + \dots \quad (3.19)$$

apabila Persamaan 3.18 dikalikan dengan 2 kemudian untuk mengurangi Persamaan 3.19, maka akan diperoleh :

$$f(y_{i+2}) - 2f(y_{i+1}) = -f(y_i) + f''(y_i) \Delta x^2 \quad (3.20)$$

$$f''(y_i) = \frac{f(y_{i+2}) - 2f(y_{i+1}) + f(y_i)}{\Delta x^2} \quad (3.21)$$

untuk tengah bentang :

$$f''(y_i) = \frac{f(y_{i+1}) - 2f(y_i) + f(y_{i-1}))}{\Delta x^2} \quad (3.22)$$

dimana,

$$f''(y_i) = \frac{d^2 y}{dx^2} = \phi$$

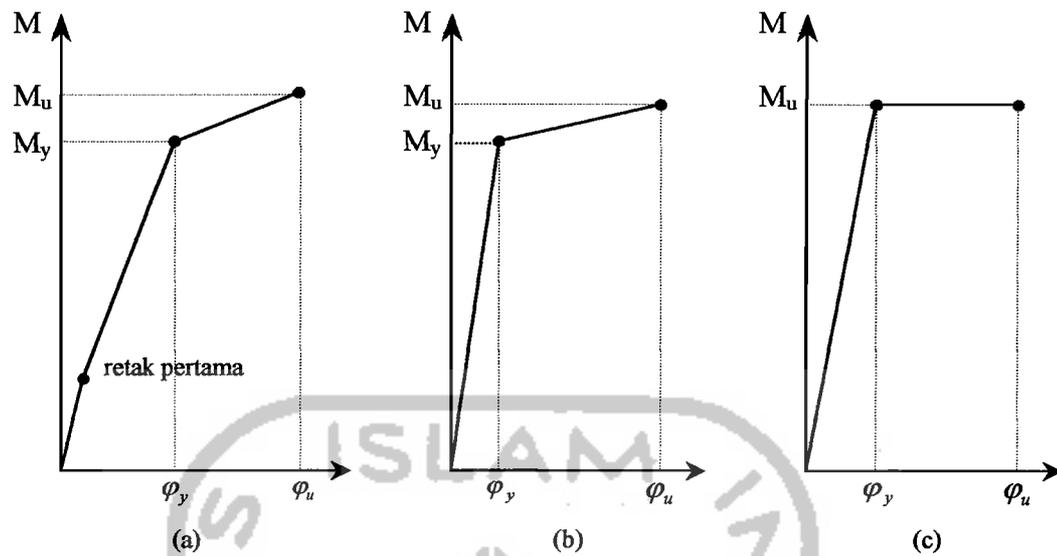
kelengkungan diperoleh dengan menggunakan tiga titik bantu yang letaknya berurutan, sehingga diperoleh persamaan kelengkungan :

$$\phi = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{\Delta x^2} \quad (3.23)$$

Mengacu pada Gambar 3.5 (a) diperoleh momen (M) :

$$M = \frac{1}{6} \cdot P \cdot L \quad (3.24)$$

Menurut Park dan Paulay (1975) hubungan $M-\phi$ yang ideal pada balok beton bertulang dapat digambarkan dengan grafik trilinear dan bilinear seperti ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Kurva idealisasi momen dan kelengkungan

Mengacu pada Gambar 3.6 (a) garis pertama menunjukkan retak awal, garis kedua adalah tegangan leleh baja dan garis ketiga merupakan regangan ultimit dari beton sehingga grafik ini disebut grafik trilinear. Gambar 3.6 (c) merupakan grafik bilinear yang dihasilkan dari pendekatan Gambar 3.6 (b) karena pada saat hubungan $M-\phi$ terjadi dari beban 0 KN hingga baja leleh, garis pertama dan kedua hampir linear sehingga grafik hubungan $M-\phi$ digambarkan dalam bentuk bilinear.

3.3.2 Perhitungan momen-kelengkungan retak

Momen-kelengkungan retak menurut Park dan Paulay (1975), dinyatakan dengan rumus sebagai berikut :

$$M_{crack} = \frac{f_r \cdot I}{Y_{bottom}} \dots \dots \dots (3.25)$$

$$\phi_{crack} = \frac{f_r}{E_c \cdot Y_{bottom}} \dots \dots \dots (3.26)$$

dengan: M_{crack} = momen retak (KNm), ϕ_{crack} = kelengkungan retak (rad/m)

$$f_r = \text{modulus retak beton} = 8\sqrt{0,00689f'_c} \text{ (Mpa)},$$

$$I = \text{inersia balok} = \frac{1}{12}.b.h^3, \quad E_c = \text{modulus elastisitas beton}$$

$$Y_{bottom} = \text{jarak garis netral ke serat tepi tertarik.}$$

3.3.3 Kondisi leleh dan batas momen-kelengkungan

Persamaan momen-kelengkungan pada saat leleh pertama dicari dengan persamaan :

$$M_y = A_s \cdot f_y \cdot jd \quad \dots\dots\dots(3.27)$$

$$\phi_y = \frac{\frac{f_y}{E_s}}{d \cdot (1-k)} \quad \dots\dots\dots(3.28)$$

$$k = \left[(\rho + \rho')^2 \cdot n^2 + 2 \cdot \left(\rho + \frac{\rho' \cdot d'}{d} \right) \cdot n \right]^{1/2} - (\rho + \rho') \cdot n \quad \dots\dots\dots(3.29)$$

dengan : M_y = momen leleh pertama, ϕ_y = kelengkungan leleh pertama

k = faktor tinggi garis netral, A_s = luas tulangan tarik,

A'_s = luas tulangan tekan, d = tinggi efektif penampang,

d' = jarak dr serat tekan ke titik berat baja tekan, f_y = tegangan leleh baja,

E_c = modulus elastisitas beton, E_s = modulus elastisitas baja,

jd = lengan dari titik berat dari baja tekan dan beton ke titik berat tulangan tarik, n = rasio modulus elastisitas.

ρ = rasio tulangan terhadap luas efektif

$$n = \frac{E_s}{E_c}, \quad \rho = \frac{A_s}{b \cdot d}, \quad \rho' = \frac{A'_s}{b \cdot d}$$

Momen-kelengkungan batas dari penampang bertulangan rangkap dicari dengan persamaan :

$$M_u = 0,85 f'_c \cdot a \cdot b \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s \cdot f_y \cdot (d - d') \quad \dots\dots\dots (3.30)$$

$$\phi_u = \frac{\epsilon_c}{c} = \frac{\epsilon_c \cdot \beta_1}{a} \quad \dots\dots\dots (3.31)$$

$$a = \frac{A_s \cdot f_y - A'_s \cdot f_y}{0,85 f'_c \cdot b} \quad \dots\dots\dots (3.32)$$

Regangan baja tekan yang ditunjukkan pada Gambar 3.3 dicari dengan persamaan :

$$\epsilon'_s = \epsilon_c \cdot \left(\frac{c - d'}{c} \right) = \epsilon_c \cdot \left(1 - \frac{\beta_1 \cdot d'}{a} \right) \quad \dots\dots\dots (3.33)$$

Dengan substitusi Persamaan 3.32 ke Persamaan 3.33 menunjukkan bahwa gaya tekan akan leleh ketika :

$$\epsilon_c \cdot \left[1 - \beta_1 \cdot d' \cdot \left(\frac{0,85 f'_c \cdot b}{(A_s \cdot f_y) - (A'_s \cdot f_y)} \right) \right] \geq \frac{f_y}{E_s} \quad \dots\dots\dots (3.34)$$

Jika Persamaan 3.34 tidak memenuhi, baja tekan tidak leleh maka nilai nyata dari tegangan baja dicari dengan Persamaan 3.9 :

$$f'_s = \epsilon'_s \cdot E_s = 0,003 \cdot \frac{a - \beta_1 \cdot d'}{a} \cdot E_s$$

dengan a (Persamaan 3.8) :

$$(0,85 f'_c \cdot b) \cdot a^2 + (600 \cdot A'_s - A_s \cdot f_y) \cdot a - (600 \cdot 0,85 \cdot d' \cdot A'_s) = 0$$

maka momen batas dapat dicari dengan persamaan :

$$M_u = 0,85 f'_c \cdot a \cdot b \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s \cdot f'_s \cdot (d - d') \dots\dots\dots(3.35)$$

dan kelengkungan batas ϕ_u dicari dengan Persamaan 3.31.

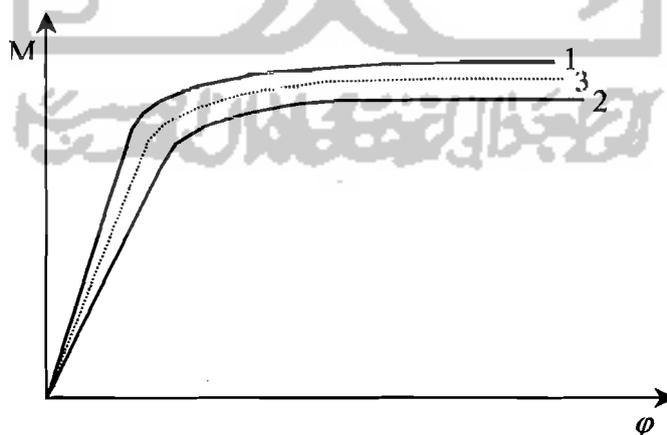
3.3.4 Momen-kelengkungan balok beton bertulang pasca bakar

Kebakaran yang terjadi pada balok beton bertulang akan menyebabkan nilai kuat tekan beton (f'_c) menurun. Penurunan kuat tekan beton mempengaruhi penurunan nilai modulus elastisitas beton sehingga akan mengakibatkan penurunan momen (M) dan kelengkungan (ϕ) yang semakin besar.

Moore dan Moore (1953) mengemukakan, *gypsum* merupakan bahan yang tahan terhadap panas. Balok beton bertulang yang dilapisi *gypsum* akan meredam panas yang terjadi, sehingga penurunan kuat tekan beton (f'_c) dapat diminimalkan maka penurunan momen (M) dapat dikurangi.

3.4 Hipotesa

Mengacu pada landasan teori tersebut di atas, dapat dibuat suatu hipotesa grafik hubungan momen-kelengkungan seperti terlihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Hubungan momen-kelengkungan balok beton bertulang pasca bakar

Keterangan gambar :

1. Balok beton bertulang tanpa mengalami pembakaran (balok beton bertulang pada suhu ruang).
2. Balok beton bertulang pasca bakar tanpa pelapisan *gypsum* (balok beton bertulang dengan selimut semen pasca bakar).
3. Balok beton bertulang pasca bakar setelah pelapisan *gypsum* mengalami peningkatan kekuatan dan kekakuan mendekati balok beton bertulang pada suhu ruang (balok beton bertulang dengan selimut *gypsum* pasca bakar).

