

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Kuat Lentur Balok Persegi

Pada suatu komposisi tertentu balok menahan beban sedemikian hingga regangan tekan lentur beton maksimum (ϵ_b' max) mencapai 0,003 sedangkan tegangan tarik baja tulangan mencapai tegangan luluh f_y . Jika hal demikian terjadi, penampang dinamakan mencapai keseimbangan regangan atau disebut penampang bertulangan seimbang (Istimawan D,1996).

Menurut Edward G. Nawy (1990) lentur pada balok diakibatkan oleh regangan yang timbul karena adanya beban luar, apabila beban bertambah maka pada balok akan terjadi deformasi dan regangan tambahan yang mengakibatkan retak lentur disepanjang bentang balok. Bila beban semakin bertambah, pada akhirnya terjadi keruntuhan elemen struktur. Tarap pembebanan yang demikian disebut keadaan limit dari keruntuhan pada lentur.

Withney mengusulkan untuk menggunakan blok tegangan segi empat ekuivalen yang digunakan untuk menghitung gaya tekan tanpa mengurangi ketelitian, yang berarti juga dapat digunakan untuk menghitung kekuatan lentur penampang seperti pada Gambar 3.1

3.4. Perhitungan Momen Retak

Momen retak secara teoritis menurut Istimawan (1996), dinyatakan dengan rumus sbb:

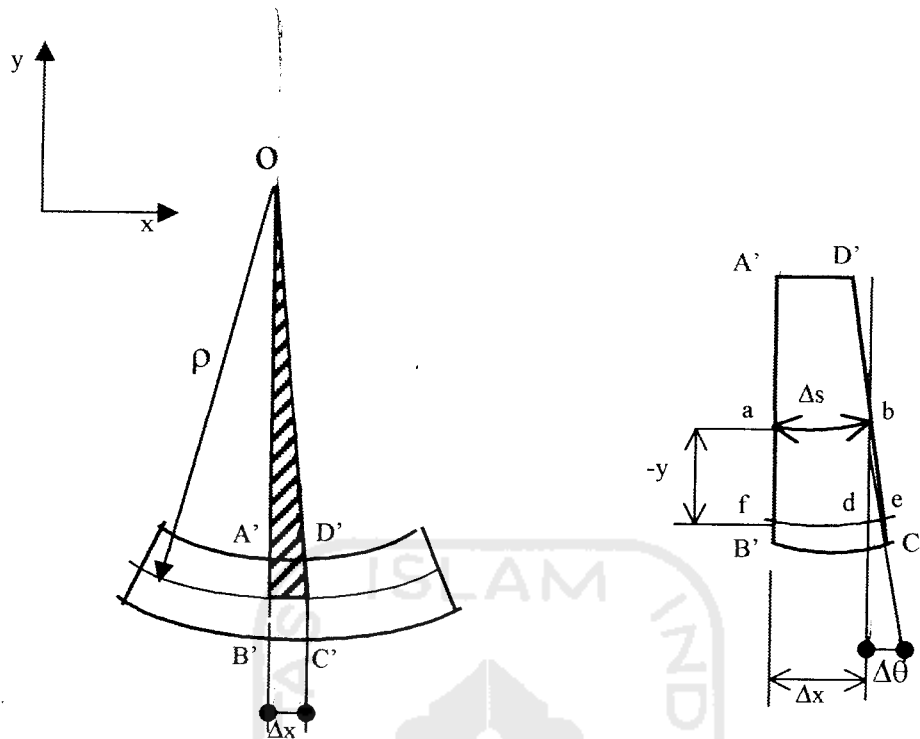
$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{Y_t} \dots\dots\dots(3.19)$$

- Dimana :
- M_{cr} = Momen Retak
 - f_r = Modulus retak beton = $0,7 \sqrt{f_c'}$
 - I_g = Inersia balok = $\frac{1}{12} b h^3$
 - Y_t = Jarak garis netral ke serat tepi tertarik

Kebakaran yang terjadi mempengaruhi penurunan nilai kuat tekan beton (f_c'), sehingga akan berpengaruh pula terhadap nilai modulus retak beton yang pada akhirnya akan memperkecil momen retak.

3.5. Persamaan Diferensial Untuk Defleksi Balok

Menurut E.P. Popov (1995), teori defleksi balok dipengaruhi oleh geometri atau kinematika dari sebuah elemen balok. Kinematika dasar yang menghipotesa bahwa irisan-irisan yang berbentuk bidang datar akan tetap merupakan bidang datar selama berdeformasi.



Gambar 3.4 Deformasi segmen balok dalam lenturan

$$\lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta \theta}{\Delta s} = \frac{d\theta}{ds} = \frac{1}{\rho} = \kappa = \varphi \dots\dots\dots(3.20)$$

Hubungan dasar antara kurva elastis dan regangan linier, didapat

$$\varphi = - \varepsilon / y \dots\dots\dots(3.21)$$

karena sifat beban tidak di perhitungkan, maka hubungan ini digunakan untuk masalah-masalah elastis maupun tidak.

$$\varepsilon = \varepsilon_x = \sigma_x / E \quad \text{dan} \quad \sigma_x = - M_y / I$$

$$\text{sehingga} \quad 1 / \rho = M / EI \dots\dots\dots(3.22)$$

dalam koordinat kartesian kurva kelengkungan didefinisikan

$$\varphi = \frac{d^2 y}{dx^2} \dots\dots\dots (3.23)$$

$$\left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{3/2}$$

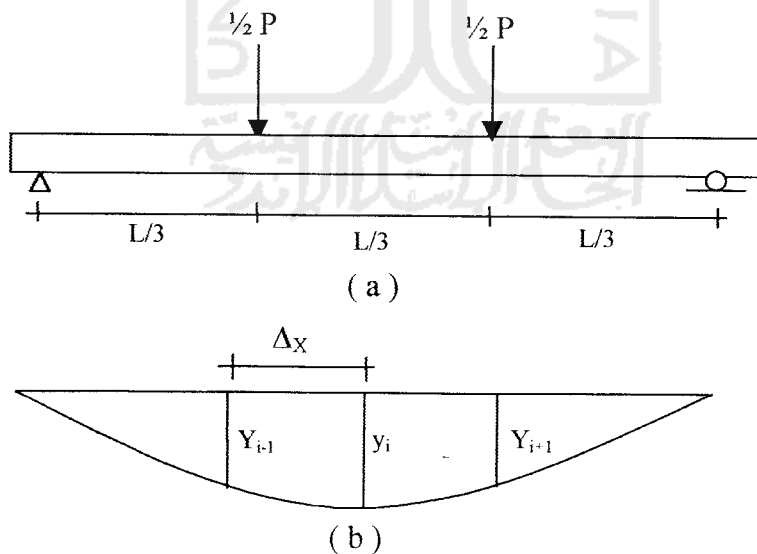
karena kemiringan dy/dx dari kurva elastis adalah sangat kecil, maka

$$\left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \approx 0$$

sehingga Persamaan (3.20) dapat disederhanakan menjadi

$$\varphi = \frac{d^2 y}{dx^2} \dots\dots\dots (3.24)$$

Dari persamaan diatas tampak bahwa kelengkungan adalah turunan kedua dari defleksi. Dari pengujian kuat lentur didapat defleksi pada titik-titik diskrit, yaitu Y_i, Y_{i+1}, Y_{i-1} , dengan jarak sama sebesar Δ_x . Pendekatan kemiringan menggunakan pendekatan metode *Central Differences*.



Gambar 3.5 Kurva lendutan

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{\Delta_x} \dots\dots\dots (3.25)$$

Dari hasil penurunan defleksi Persamaan 3.25 diperoleh rumus kelengkungan, yaitu

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{y_{I+1} - 2y_I + y_{I-1}}{\Delta_x^2} \dots\dots\dots(3.26)$$

$$\varphi = \frac{y_{I+1} - 2y_I + y_{I-1}}{\Delta_x^2} \dots\dots\dots(3.27)$$

Mengacu kepada Gambar 3.5 (a) didapat momen M

$$M = 1/6 PL^2 \dots\dots\dots(3.28)$$

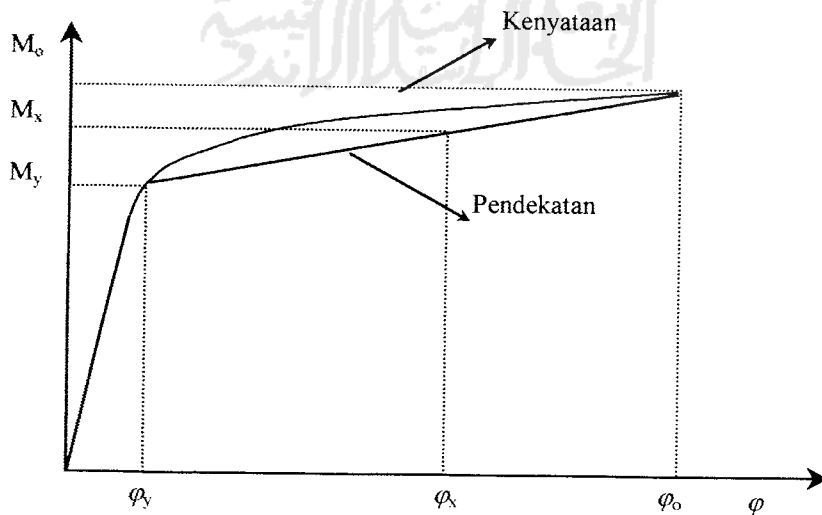
Sehingga dapat disimpulkan besar EI dengan rumus :

$$EI = M/\varphi \dots\dots\dots(3.29)$$

$$M = EI/\varphi \dots\dots\dots(3.32)$$

$$M = EI d^2y/dx^2 \dots\dots\dots(3.33)$$

Hubungan Momen (M) dan Kelengkungan (φ) ditunjukkan pada Gambar 3.6 (Roufaiel dan meyer, 1983) dalam buku Dipasquale.

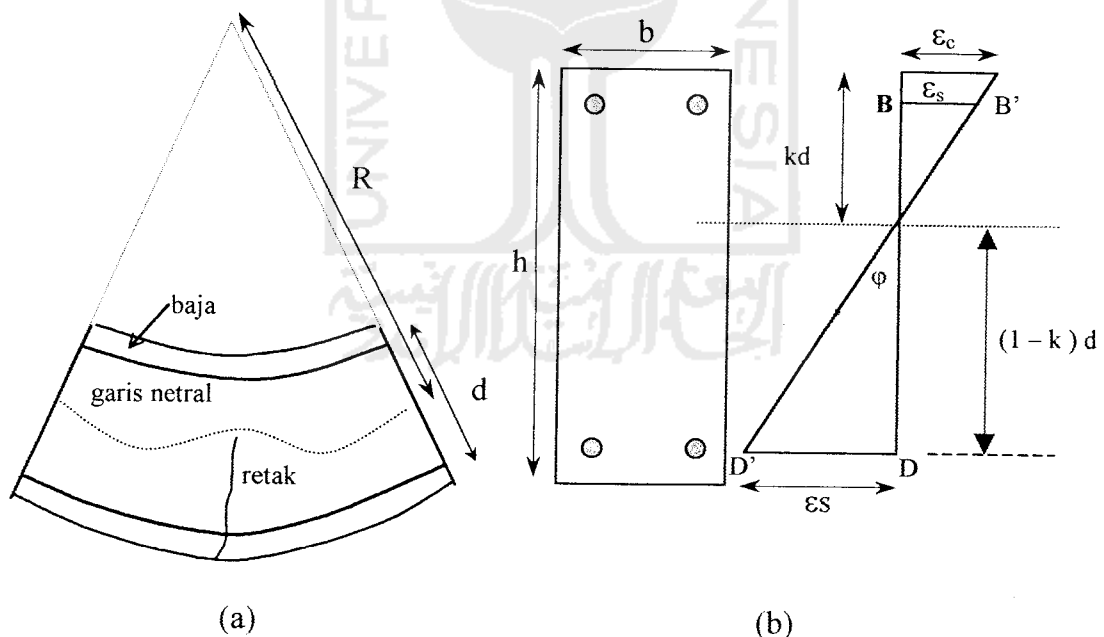


Gambar 3.6 Grafik momen kelengkungan

3.6. Momen dan Kelengkungan1

1. Kelengkungan balok

Menurut Park dan Pauley (1975), kelengkungan balok didapat dengan mengambil sebuah elemen lurus dari sebuah balok beton bertulang dengan momen-momen ujung dan gaya axial yang sama seperti Gambar 3.7. Jari-jari kelengkungan R diukur dari garis netral. Adanya retak-retak pada beton akibat terjadi penambahan tegangan akan merubah jari-jari kelengkungan (R), tinggi netral (kd), regangan beton (ϵ_c) dan regangan baja tarik (ϵ_s). Berdasar teori tersebut, retak beton akibat kebakaran akan bertambah jika dilakukan penambahan beban.



Gambar 3.7 Kelengkungan balok

Menganggap sebuah elemen kecil dengan panjang dx dari balok dan menggunakan notasi seperti pada Gambar 3.7 maka rotasi diantara ujung-ujung dari elemen diberikan oleh :

$$\frac{dx}{R} = \frac{\varepsilon_c dx}{kd} = \frac{\varepsilon_s dx}{d(1-k)} \dots\dots\dots(3.32)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{\varepsilon_c}{kd} = \frac{\varepsilon_s}{d(1-k)} \dots\dots\dots(3.33)$$

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

dari Gambar 3.7 (b) jika regangan dijumlahkan diperoleh :

$$\varphi = \frac{\varepsilon_c}{kd} = \frac{\varepsilon_s}{d(1-k)} = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_s}{d} \dots\dots\dots(3.34)$$

dengan : φ = kelengkungan

ε_c = regangan beton

ε_s = regangan baja

d = tinggi efektif penampang

Ini menunjukkan bahwa kelengkungan φ adalah gradien dari regangan dari elemen seperti dalam Gambar 3.7. Kelengkungan akan benar-benar berubah sepanjang bentang balok karena naik-turunnya garis netral dan regangan-regangan diantara retak-retak. Jika panjang elemen adalah kecil dan sebuah retak berakhir, kelengkungan dihitung dengan Persamaan 3.34 untuk penampang ijin yang diperoleh dari hubungan momen-kelengkungan. Dua grafik yang diperoleh dari penghitungan balok bertulangan sebelah adalah lurus/linear diawal dan hubungan antara momen dan kelengkungan diberikan oleh persamaan :

$$EI = MR = \frac{M}{\varphi} \dots\dots\dots(3.37)$$

Dimana EI adalah faktor kekakuan dari penampang. Dengan peningkatan momen, retak pada beton mengurangi faktor kekakuan di penampang. Perilaku dari penampang setelah retak tergantung dari jumlah tulangan pokok. Balok bertulangan sedikit menghasilkan sebuah kurva linear $M-\phi$ diatas titik leleh baja. Ketika baja leleh, peningkatan yang besar terjadi didalam kelengkungan pada momen hampir konstan.

Hubungan $M-\phi$ yang ideal adalah ditunjukkan pada grafik tri-linear. Garis awal pertama adalah retak awal, garis kedua adalah tegangan leleh baja dan ketiga adalah regangan ultimit dari beton. Untuk balok beton bertulang dibawah beban layan hubungan $M-\phi$ dari beban 0 sampai leleh baja kedua garis hampir linear sehingga sering juga ditampilkan grafik hubungan $M-\phi$ dalam bentuk bi-linear.

2. Leleh dan Ultimit Momen – Kelengkungan

Gambar 3.7 menunjukkan kasus umum dari sebuah penampang persegi bertulangan ganda pada leleh pertama dari tegangan baja dan regangan ultimit beton. Kelengkungan pada leleh pertama dari baja ϕ_y dicari dengan Persamaan 3.34 dalam istilah dari regangan baja saat leleh.

Persamaan Momen-Kelengkungan pada saat leleh pertama dicari dengan Persamaan :

$$k = [(\rho + \rho')^2 n^2 + 2(\rho + \frac{\rho' d'}{d})n]^{1/2} - (\rho + \rho')n \dots\dots\dots (3.36)$$

$$M_y = A_s f_y j d \dots\dots\dots (3.37)$$

$$\phi_y = \frac{\frac{f_y}{E_s}}{d(1-k)} \dots\dots\dots (3.38)$$

Dengan : k = faktor tinggi garis netral

M_y = Momen leleh pertama

ϕ_y = Kelengkungan leleh pertama

A_s = Luas tulangan tarik

A'_s = Luas tulangan tekan

d = tinggi efektif penampang

d' = jarak dari serat tekan ketitik berat baja tekan

E_c = Modulus elastis beton

E_s = Modulus elastis baja

f_y = Tegangan leleh baja

jd = lengan dari titik berat dari baja tekan dan beton ketitik

berat

tulangan tarik.

$n = E_s/E_c, \rho = A_s/bd, \rho' = A'_s/bd$

Dengan asumsi bahwa modulus elastis beton untuk beton pasca bakar sama dengan nilai modulus elastis beton sebagai berikut:

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \dots\dots\dots(3.39)$$

maka akibat kebakaran, nilai kuat tekan beton (f'_c) akan menurun. Penurunan kuat tekan beton mempengaruhi penurunan nilai modulus elastisitas beton. Dengan demikian nilai perbandingan antara modulus elastisitas baja terhadap modulus elastisitas beton (n) akan semakin besar.

Pengaruh nilai n yang semakin besar akan mempertinggi faktor tinggi garis netral (k). Seperti dijelaskan dimuka tentang perubahan kekuatan baja yang tidak diperhitungkan, maka dari Persamaan 3.38 dapat diperoleh kelengkungan yang semakin besar sebanding dengan perubahan nilai k . Berdasar Persamaan 3.38 diperoleh nilai kelengkungan leleh pertama ϕ_y yang semakin besar.

Kelengkungan ultimit dan momen dari penampang bertulangan rangkap (lihat Gambar 3.7) dicari dengan Persamaan :

$$a = \frac{A_s \cdot f_y - A'_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} \dots \dots \dots (3.40)$$

$$Mu = 0,85 \cdot f_c' \cdot ab \left(d - \left(\frac{a}{2} \right) \right) + A'_s \cdot f_y (d - d') \dots \dots \dots (3.41)$$

$$\phi_y = \frac{\epsilon_c}{c} = \frac{\epsilon_c \cdot \beta_1}{a} \dots \dots \dots (3.42)$$

nilai a yang semakin besar akibat kebakaran akan memperkecil kelengkungan ultimit.

Regangan baja tekan yang ditunjukkan pada Gambar 3.7 dicari dengan persamaan :

$$\epsilon_s' = \epsilon_c \left(\frac{c - d'}{c} \right) = \epsilon_c \left(1 - \left(\frac{\beta_1 d'}{a} \right) \right) \dots \dots \dots (3.43)$$

Dengan substitusi Persamaan 3.40 ke Persamaan 3.43 menunjukkan bahwa gaya tekan akan leleh ketika :

$$\epsilon_c \left[1 - \beta_1 d' \left(\frac{0,85 f_c' b}{(A_s f_y) - (A'_s f_y)} \right) \right] \geq \frac{f_y}{E_s} \dots \dots \dots (3.44)$$

Jika Persamaan 3.44 kurang sesuai, baja tekan tidak leleh maka nilai nyata dari tegangan baja dicari dengan Persamaan :

$$f_s' = \varepsilon_s' E_s = 0,003 \frac{a - \beta_1 d'}{a} E_s \dots\dots\dots(3.45)$$

dengan

$$a = \frac{A_s f_s - A_s' f_s'}{0,85 f_c' b} \dots\dots\dots(3.46)$$

maka momen ultimit dapat dicari dengan Persamaan:

$$M_u = 0,85 f_c' a b \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' E_s \varepsilon_s' \frac{a - \beta_1 d'}{a} (d - d') \dots\dots\dots(3.47)$$

dan kelengkungan ϕ_u dicari dengan Persamaan 3.42

Ukuran dari meningkatnya momen lentur setelah leleh dikenal M_u/M_y . Rasio ini ditentukan dari Persamaan 3.37 dan 3.41. Rasio ϕ_u/ϕ_y dapat ditulis seperti:

$$\frac{\Phi_u}{\Phi_y} = \frac{\varepsilon_c}{f_y/E_s} \cdot \frac{d(1-k)}{a/\beta_1} \dots\dots\dots(3.48)$$

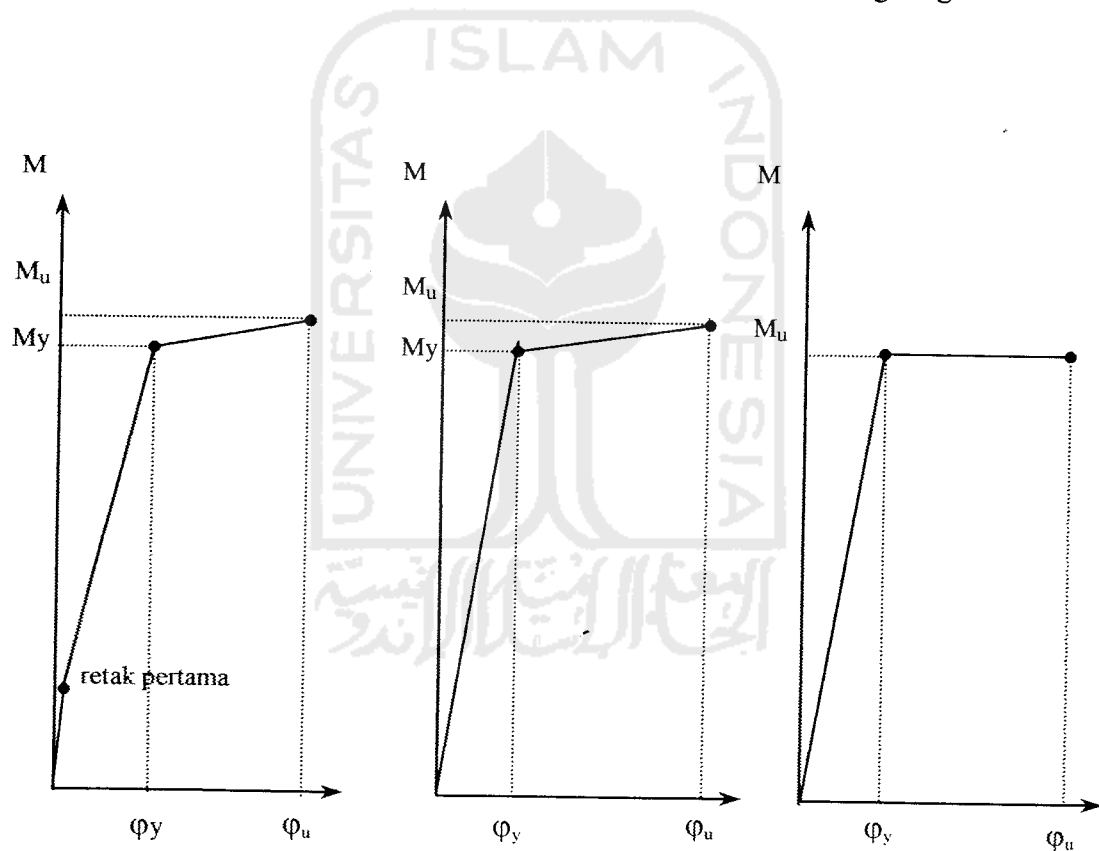
Persamaan 3.48 digunakan untuk menentukan daktilitas kelengkungan dalam kasus umum dari penampang bertulangan ganda. Jika Persamaan 3.44 memuaskan, baja tekan leleh dan substitusi Persamaan 3.36 dan 3.40 ke dalam Persamaan 3.48, didapatkan persamaan faktor kelengkungan daktil menurut Park dan Paulay (1975), yaitu:

$$\frac{\varphi_u}{\varphi_y} = \left(\frac{0,85 \beta_1 E_s \varepsilon_c f_y'}{f_y^2 (\rho - \rho_1)} \right) \left\{ 1 + (\rho - \rho_1)n - [(\rho + \rho^2)n^2 + 2 \left(\left(\rho + \frac{\rho' d'}{d} \right) n \right)^2] \right\} \dots\dots\dots(3.49)$$

Jika baja tekan belum leleh maka faktor kelengkungan dicari dengan Persamaan :

$$\frac{\phi_u}{\phi_y} = \left(\frac{\beta_1 E_s \epsilon_c}{f_y} \right) \times \left(\frac{1 + (\rho - \rho_1)n - (\rho + \rho^2)n^2 + 2 \left(\rho + \left(\frac{\rho d'}{d} \right) n \right)^2}{\left(\frac{(\rho \epsilon_c E_s - \rho f_y)^2}{1,7 f_c'} \right) + \left(\frac{\rho \epsilon_c E_s \beta_1 d'}{0,85 f_c' d} \right)^2 - \left(\frac{\rho \epsilon_c E_s - f_y}{1,7 f_c'} \right)} \right) \quad (3.50)$$

Mengacu pada Persamaan 3.38 dan 3.42 serta 3.49 dan 3.50 perubahan material yang berupa penurunan f_c' berpengaruh terhadap kenaikan nilai ϕ_y dan penurunan ϕ_u menyebabkan penurunan rasio faktor daktilitas kelengkungan beton.

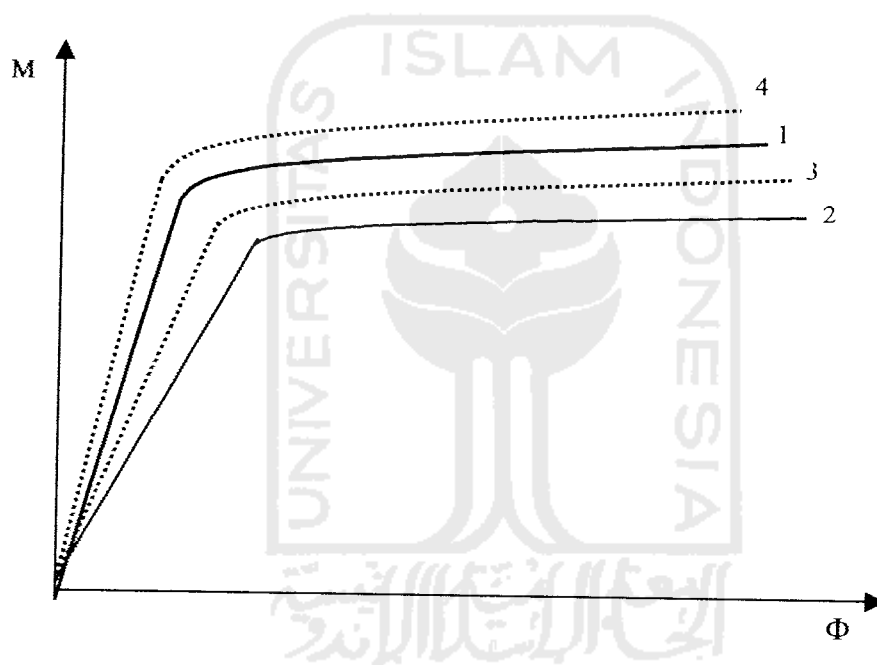


Gambar 3.8 Curva momen kelengkungan

3.7. Hipotesa

Setelah balok mengalami kebakaran nilai EI turun yang menyebabkan nilai M kecil, sehingga kekuatan $P = 6 M/L$ berkurang. Perbaikan beton pasca bakar akan meningkatkan nilai EI yang juga akan meningkatkan kekuatan dan kekakuan balok.

Hubungan momen M dan kelengkungan balok Φ yang telah diperbaiki ditunjukkan Gambar 3.9



Gambar 3.9 hubungan M dan Φ balok beton pasca bakar

Keterangan gambar :

1. Balok utuh tanpa mengalami pembakaran.
2. Balok setelah kebakaran tanpa perbaikan
3. Balok pasca bakar setelah perbaikan mengalami peningkatan kekuatan dan kekakuan mendekati balok utuh
4. Balok pasca bakar setelah perbaikan mengalami peningkatan kekuatan dan kekakuan melebihi balok utuh.