

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1. Beton Bertulang

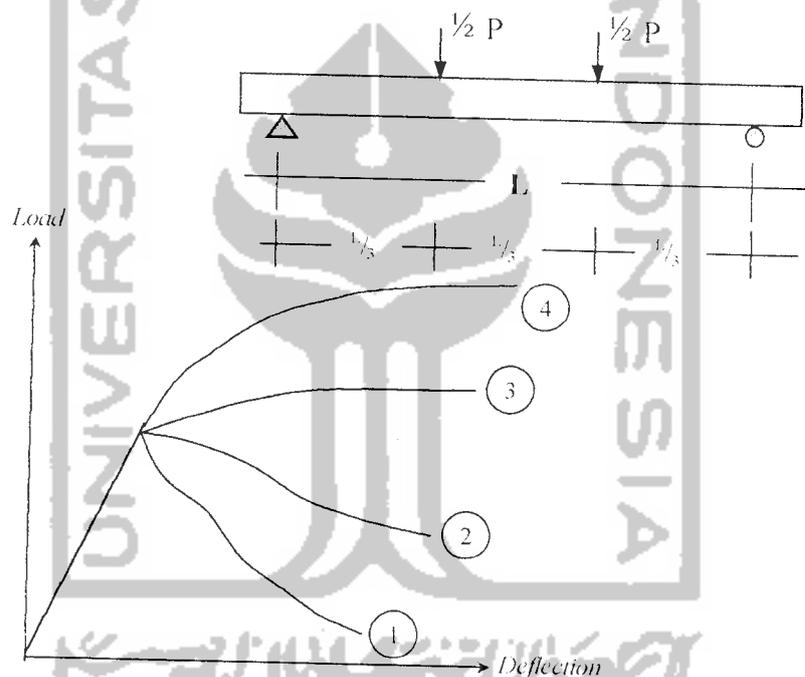
Beton terbuat dari bahan *Portland cement* (PC atau semen), air, agregat atau batuan kasar dan halus dalam proporsi berbanding tertentu. Semen akan bersifat sebagai bahan perekat apabila dicampur dengan air. Perbandingan campuran air dan semen disebut faktor air semen (f.a.s.) pada adukan beton basah akan mempengaruhi sifat lekatan antar butiran semen (*gel*) dalam pasta semen, antar agregat halus maupun kasar, dan sifat permeabilitas pasta semen, sehingga secara keseluruhan akan mempengaruhi juga sifat-sifat beton. Selain itu, kekuatan beton dipengaruhi pula oleh kekerasan, ketahanan aus dan kekerasan dari agregat kasar, kekasaran dan kebersihan agregat halus, serta komposisi atau gradasi dari agregat yang digunakan.

Pada penggunaan sebagai komponen struktur bangunan, umumnya beton diperkuat dengan tulangan baja sebagai bahan yang dapat bekerja sama dan mampu membantu kelemahannya, terutama pada bagian yang menahan gaya tarik. Dengan demikian, tulangan baja berfungsi untuk memperkuat dan menahan gaya tarik, sedangkan beton hanya diperhitungkan untuk menahan gaya tekan. Komponen

struktur beton seperti itu disebut sebagai beton bertulangan baja atau lazim disebut beton bertulang.

3.2. Pengaruh Beton Terhadap Penambahan Serat

Beton serat adalah konstruksi beton dengan bahan susun semen, agregat halus, dan agregat kasar serta sejumlah kecil serat (*fiber*). Menurut **Perumalsamy N. Balaguru dan Surendra P. Shah (1992)**, grafik defleksi balok akibat pembebanan dengan memakai beton serat terlihat pada Gambar 3.1:



Gambar 3.1. Grafik defleksi pada beton

Grafik yang terlihat pada Gambar 3.1. menjelaskan bahwa sebelum beton retak, grafik masih dalam bentuk garis linier. Setelah tegangan ijin terlampaui maka beton mengalami retak. Dengan adanya variasi jumlah serat yang ada dalam beton maka terbentuklah grafik 1 - 4. Grafik 1 dan 2 menunjukkan bahwa energi yang dapat

diserap (*diabsorbsi*) oleh serat lebih kecil daripada energi yang diserap beton sebelum retak. Sedangkan pada grafik 3 dan 4 menunjukkan bahwa energi yang dapat diserap oleh serat lebih besar daripada energi yang diserap oleh beton sebelum retak. Perbedaan grafik ini diakibatkan oleh faktor-faktor jumlah serat, jenis serat, bentuk serat, karakteristik beton dan jenis pembebanan yang ada. Jika fiber menyerap energi lebih dari 10%, fiber tersebut seharusnya memiliki kekuatan yang lebih besar dari yang ditunjukkan grafik 4. Daya serap yang disediakan oleh fiber juga tergantung ikatan antara fiber dengan beton. Untuk konstruksi beton yang besar, tipe yang paling umum adalah sama dengan grafik 1 atau 2, untuk konstruksi seperti itu peranan fiber paling baik diukur dengan kuat lentur. Perbedaan grafik ini disebabkan oleh berbagai faktor, antara lain jumlah serat, jenis serat, bentuk serat, karakteristik beton dan jenis pembebanan yang ada.

Dengan menggunakan prinsip keseimbangan statika dapat ditentukan besar momen yang terjadi pada setiap penampang balok yang bekerja menahan beban. Untuk menentukan kemampuan balok dalam menahan beban dengan cara memperhitungkan tegangan yang timbul didalamnya. Distribusi tegangan-regangan pada penampang balok dan hasil perhitungan yang tepat, dapat diperoleh berdasarkan teori elastisitas. Dengan menggunakan asumsi-asumsi dan penyederhanaan tertentu dapat dikembangkan hubungan matematik untuk memperoleh tegangan lentur dan geser. Untuk balok dari bahan homogen (serba sama) dan elastik berlaku rumus lenturan sebagai berikut:

$$f = \frac{M.C}{I} \dots\dots\dots (3.1)$$

dengan, f = tegangan lentur

M = momen yang bekerja pada balok

C = jarak serat terluar terhadap garis netral

I = momen inersia penampang balok terhadap garis netral

Penambahan *steel fibers* dengan orientasi random akan meningkatkan kuat lentur beton fiber sekitar 2 sampai 3 kali lipat dibanding kuat lentur beton non fiber. Sifat getas dari beton akan dapat diatasi oleh adanya fiber sehingga beton fiber akan menjadi liat oleh karena itu beton fiber dapat dipergunakan pada perencanaan bagian-bagian penting dari struktur (tidak semua), yaitu pada kuat lentur ultimit untuk fiber *reinforced concrete*, **Swamy & Al-Noori (1975)**.

Kehadiran serat pada beton akan menaikkan kekakuan dan mengurangi lendutan (*defleksi*) yang terjadi. Penambahan serat memungkinkan penggunaan baja mutu tinggi tanpa ada bahaya karena retak maupun lendutan yang berlebihan. Swamy juga menyimpulkan bahwa penambahan serat akan dapat meningkatkan keliatan beton, sehingga struktur akan terhindar dari keruntuhan yang tiba-tiba akibat beban yang berlebihan, **Swamy dkk (1979)**.

3.3. Pengaruh Temperatur Tinggi Pada Beton

Kerusakan pada beton dapat pula disebabkan oleh perbedaan angka muai antara agregat dan pasta semen. Perbedaan ini menyebabkan kerusakan *interfacial zone*

sehingga lekatan antar batuan menjadi berkurang banyak. Pada suhu kamar angka muai batuan pada umumnya lebih rendah dari pada pasta semen. Sampai pada suhu 200°C pasta semen menyusut sedang batuan mengembang. Perbedaan ini dapat menimbulkan retak-retak pada beton.

Namun yang paling nyata, kerusakan beton mengelupas disebabkan oleh tekanan uap air (5% – 7% volume) atau gas yang terperangkap didalam beton yang dikenal dengan teori “*moisture clog spalling*”, beton semakin rapat (*impermeable*) semakin mudah terjadi pengelupasan oleh panas, karena uap air tidak mudah mengalir melalui pori kedalam daerah yang lebih dingin (lebih dalam letaknya). Oleh peningkatan temperatur yang cepat diikuti oleh hambatan aliran air disebelah dalam (pori rapat, dan uap air jenuh) akan berpotensi timbulnya ledakan.

Di sisi lain kekuatan baja tulangan sangat dipengaruhi oleh temperatur. Pada temperatur 550°C baja akan mengalami penurunan tegangan leleh sebesar 50%. Namun demikian apabila temperatur tersebut kembali normal tegangan leleh baja hampir pulih kembali. Pengaruh temperatur pada tegangan leleh baja banyak tergantung pada jenis baja. Untuk melindungi baja dari api, biasanya dilakukan dengan meningkatkan lapis penutup tulangan (*concrete cover*). Peningkatan lapis penutup tulangan dilain pihak memudahkan terjadinya pengelupasan, oleh karena itu pada lapis ini beton tidak diperkuat tulangan. Sehingga antara tulangan dan beton lapis penutup tulangan terdapat saling ketergantungan.

Pada suhu tinggi terjadi penurunan tegangan leleh baja tulangan yang disertai lendutan pada balok. Pada suhu normal tegangan leleh balok kembali seperti semula tetapi lendutan yang terjadi tidak kembali lagi. Lendutan balok juga diakibatkan oleh pembebanan dan degradasi material (beton dan baja tulangan), **Stasiun General UGM (1999)**.

3.4. Sifat Fisik Beton Pada Temperatur Tinggi

Tiga sifat dari bahan penyusun beton yang mempengaruhi perilaku beton bila dipanasi yaitu: koefisien muai panas, panas jenis dan daya hantar panas. Jika koefisien muai panas bahan susun beton makin besar, maka semakin besar pula koefisien muai panas betonnya. Aspek lain dari pengamatan masalah ini memberikan pengertian bahwa jika perbedaan koefisien muai panas antara pasta semen dan agregat terlalu besar, maka dapat menimbulkan keretakan pada pasta semennya.

Pada saat kenaikan temperatur, gerakan panas pada beton merupakan hal yang sangat sulit untuk diperkirakan. Hal ini tergantung pada sifat beton maupun agregat yang digunakan. Pada kisaran temperatur tertentu, agregat mengembang karena memuai, sedang beton menyusut karena dehidrasi, **Hansen (1976)**.

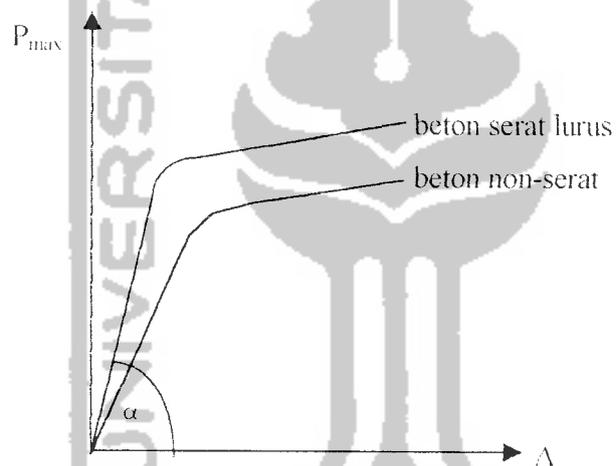
3.5. Pengaruh Temperatur Pada Modulus Elastisitas Beton

Perubahan suhu dapat mempengaruhi modulus elastisitas beton, modulus elastisitas dapat menurun disebabkan oleh perilaku suhu tinggi. Nilai modulus elastisitas dari beton turun 25% jika dipanaskan sampai 500°F dan turun 50% jika dipanaskan 800°F, **Hansen (1976)**.

Beton dan baja mempunyai nilai muai yang hampir sama, dimana untuk setiap kenaikan suhu 1°C angka muai beton 0,000013 sedangkan baja 0,000012 sehingga tegangan yang timbul karena perbedaan nilai dapat diabaikan, **Istimawan D. (1994)**.

3.6. Hubungan Beban dan Lendutan

Hubungan beban (P) dengan lendutan (Δ) diperoleh dari hasil uji pembebanan (*loading test*). Sesuai yang dilakukan Suhendro (1991) pemberian beban pada balok akan mengakibatkan penurunan (defleksi).



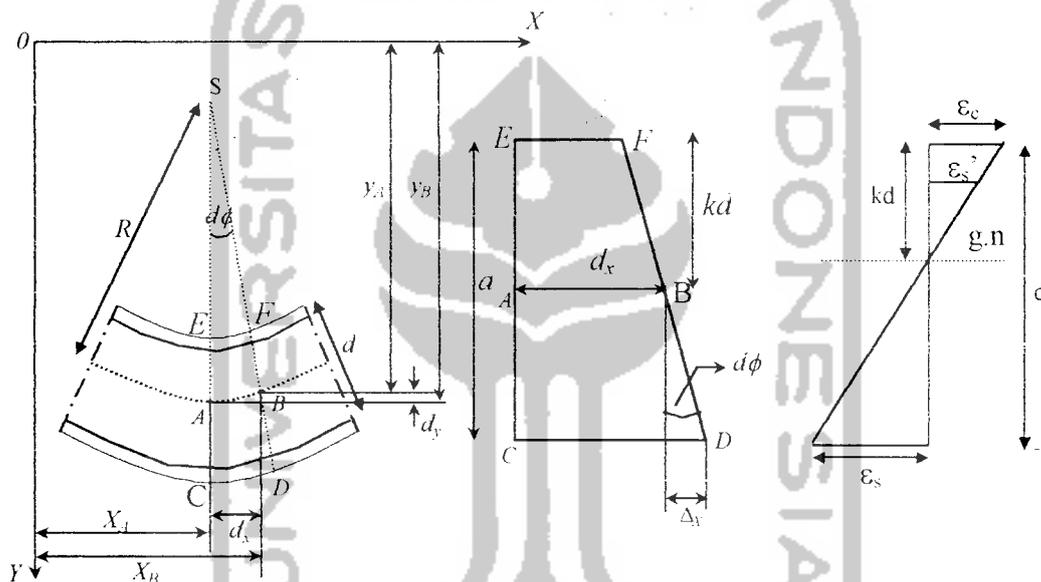
Gambar 3.3. Diagram hubungan antara beban (P) dan lendutan (Δ)

Dari hubungan antara kekuatan (P) dan lendutan (Δ) pada Gambar 3.3, maka diperoleh kekakuan balok (k), lihat persamaan 3.2:

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{P}{\Delta} \dots \dots \dots (3.2)$$

3.7. Persamaan Differensial Untuk Defleksi

Teori defleksi balok dipengaruhi oleh geometri atau kinematika dari sebuah elemen balok. Menurut **Sumono (1982)**, sumbu-balok yang semula lurus, menjadi garis bengkok (melengkung) setelah balok menahan momen-lengkung. Garis-bengkok yang diwujudkan oleh sumbu-balok itu dinamakan garis-elastis atau garis-lentur.



Gambar 3.4. Deformasi segmen balok dalam lenturan

Dari Gambar 3.4 kita dapat menyelidiki dua titik A dan B, sebagai berikut:

$$d_y = y_B - y_A$$

$$d_x = x_B - x_A$$

$$AB = d_s = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} = d_x \sqrt{1 + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2} \dots\dots\dots(3.3)$$

Garis-garis normal yang ditarik dari titik-titik A dan B memotong di titik S sehingga

SA = r adalah radius bengkokan di A atau $\frac{1}{r} =$ derajat bengkokan di A. Dari Gambar

3.4 dapat kita lihat bahwa:

$$AB = d_s = r \cdot d\phi \dots\dots\dots(3.4)$$

$$r = \frac{d_s}{d\phi} = \frac{d_x}{d\phi} \frac{dtg\phi}{d\phi} \dots\dots\dots(3.5)$$

untuk $\frac{dtg\phi}{d\phi} = \sec^2 \phi = 1 + tg^2\phi = 1 + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2 \dots\dots\dots(3.5a)$

Jika persamaan (3.3) dan (3.5a) disubstitusikan ke persamaan (3.5), maka:

$$r = \frac{d_x \sqrt{1 + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2}}{d\phi} \left\{ 1 + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2 \right\} \dots\dots\dots(3.6)$$

$$\frac{1}{r} = \frac{dtg\phi}{d_x} \frac{d_x}{\left\{ 1 + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} \dots\dots\dots(3.7)$$

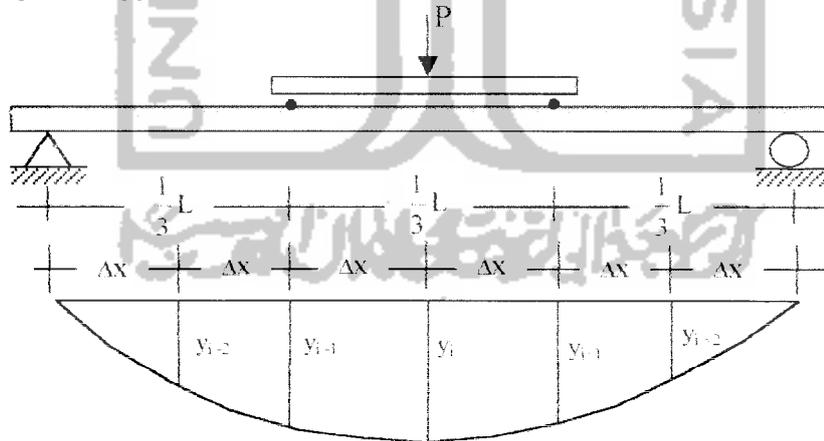
$$\frac{1}{r} = \frac{d'''}{d_v^2} \left\{ 1 + \left(\frac{d'''}{d_v} \right)^2 \right\}^{3/2} \quad (3.8)$$

Karena ordinat-ordinat garis-elastis itu kecil sekali, maka $\frac{d'''}{d_v}$ juga amat kecil nilainya terhadap satuan, sehingga $\frac{d'''}{d_v^2}$ boleh diabaikan terhadap 1. Jadi, persamaan

(3.8) atau disebut juga persamaan derajat bengkakan ditulis:

$$\frac{1}{r} = \frac{d'''}{d_v^2} \quad (3.9)$$

dari pengujian kuat lentur didapat defleksi pada titik-titik diskrit. Pendekatan kemiringan menggunakan metode *central difference*.



Gambar 3.5. Defleksi balok

$$\frac{d_y}{d_x} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta Y} \dots \dots \dots (3.10)$$

$$\frac{d^2_y}{d_x^2} = \frac{\frac{d}{dx}(y_{i+1} - y_{i-1})2\Delta Y - \frac{d}{dx}(2\Delta Y)(y_{i+1} - y_{i-1})}{(2\Delta Y)^2} \dots (3.11)$$

Karena ΔY nilainya konstan maka $\frac{d}{dx}(2\Delta Y)(y_{i+1} - y_{i-1}) = 0$, sehingga persamaan (3.11) menjadi:

$$\frac{d^2_y}{d_x^2} = \frac{\frac{d}{dx}(y_{i+1} - y_{i-1})2\Delta Y}{(2\Delta Y)^2} \dots \dots \dots (3.12)$$

Sehingga persamaan (3.12) menjadi:

$$\frac{d^2_y}{d_x^2} = \frac{\left(\frac{y_{i+1} - y_i}{2\Delta Y}\right) - \left(\frac{y_i - y_{i-1}}{2\Delta Y}\right)2\Delta Y}{(2\Delta Y)^2} \dots \dots \dots (3.13)$$

$$\frac{d^2_y}{d_x^2} = \frac{(y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}))}{(2\Delta Y)^2} \dots \dots \dots (3.14)$$

Menurut Timoshenko, kelengkungan balok didekati dengan :

$$\phi = \frac{d^2_y}{dx^2} \dots \dots \dots (3.15)$$

Jadi, persamaan kelengkungan balok yaitu:

$$\phi = \frac{1}{r} = \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{(y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}))}{(2\Delta X)^2} \dots\dots\dots(3.16)$$

Mengacu pada Gambar 3.5. didapat momen (M):

$$M = \frac{1}{8} PL \dots\dots\dots(3.17)$$

sehingga dapat disimpulkan besar EI dengan rumus:

$$EI = M/\phi \dots\dots\dots(3.18)$$

$$M = EI \cdot \phi \dots\dots\dots(3.19)$$

$$M = EI \frac{d^2 y}{dx^2} \dots\dots\dots(3.20)$$

Setelah balok mengalami kebakaran, nilai EI menjadi turun yang menyebabkan nilai M menjadi kecil, sehingga kekuatan ($P = \frac{6M}{L}$) menjadi berkurang. Dalam penelitian ini, perbaikan nilai EI dengan menambahkan serat kawat bendrat diharapkan nilai EI meningkat, sehingga nilai M meningkat, kekuatan dan kekakuan balok juga meningkat.

3.8. Momen Lentur Penampang Persegi Balok Beton Bertulang

3.8.1. Momen lentur beton normal

Untuk menghitung kuat lentur nominal, M_n dipakai pemisalan-pemisalan sebagai berikut :

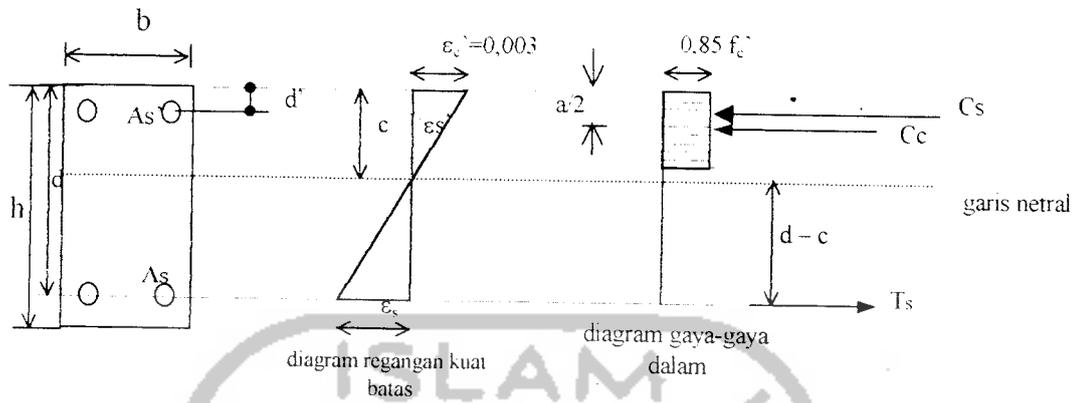
1. Kekuatan unsur didasarkan pada hitungan yang memenuhi syarat keseimbangan dan kompatibilitas regangan
2. Regangan di dalam baja tulangan dan beton dimisalkan berbanding lurus dengan jarak terhadap garis netral
3. Regangan maximum yang dapat dipakai pada syarat tekan sebesar 0,003
4. Kekuatan tarik beton diabaikan
5. Modulus elastis baja diambil sebesar $2 \cdot 10^5$ Mpa
6. Untuk alasan praktis maka hubungan antara distribusi tegangan tekan dan regangan dari beton pada saat tercapai kekuatan normal dapat diambil sebagai distribusi tegangan persegi ekuivalen, dengan intensitas tegangan beton yang merata sebesar $0,85f_c$ setinggi $a=\beta \cdot c$ dari syarat tekan maximum. Harga β diberikan oleh rumus sebagai berikut :

Untuk $f_c < 30$ MPa maka:

$$\beta = 0,85 \dots\dots\dots (3.21)$$

Untuk $f_c > 30$ MPa maka

$$\beta = 0,85 - 0,008(f_c - 30) \geq 0,65 \dots\dots\dots (3.22)$$



Gambar 3.7. Distribusi regangan dan tegangan lentur balok beton normal bertulang (SK SNI T-15-1991-03)

Gaya-gaya dalam adalah :

$$C_s = A's \cdot f_y \dots \dots \dots (3.23)$$

$$C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \dots \dots \dots (3.24)$$

$$T_s = A_s \cdot f_y \dots \dots \dots (3.25)$$

Keseimbangan gaya-gaya dalamnya yaitu $C_s - C_c - T_s = 0$, sehingga:

$$a = \frac{A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \dots \dots \dots (3.26)$$

Letak garis netral adalah

$$c = \frac{a}{\beta} \dots \dots \dots (3.27)$$

Regangan baja tarik pada saat dicapainya regangan beton yaitu $\epsilon_{cu} = 0,003$

$$\epsilon_s = \frac{d - c}{c} (0,003) \dots \dots \dots (3.28)$$

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \dots\dots\dots(3.29)$$

Kekuatan momen lentur nominal adalah:

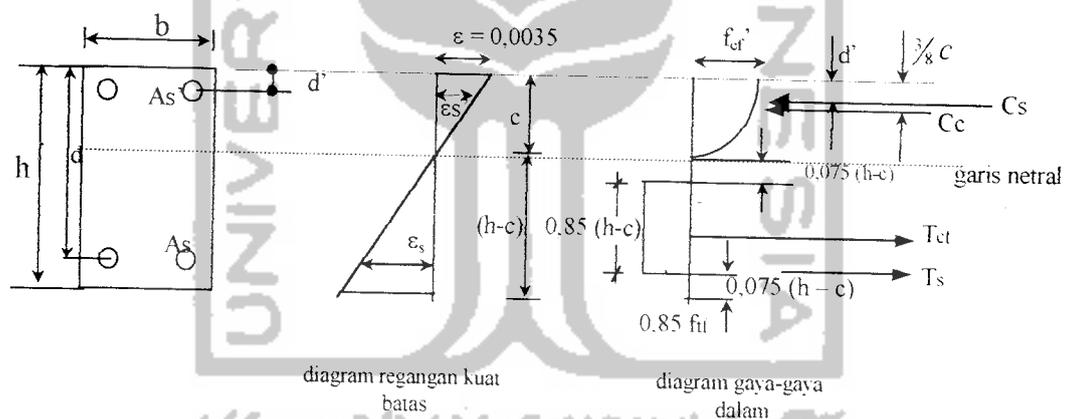
$$M_n = C_c(d - 0,5.a) + C_s(d - d') \dots\dots\dots(3.30)$$

atau

$$M_n = T(d - 0,5.a) + C_s(d - d') \dots\dots\dots(3.31)$$

3.8.2. Momen lentur beton bertulang yang diberi serat

Distribusi tegangan dan regangan yang diusulkan **Suhendro** untuk beton serat terlihat pada Gambar 3.8



Gambar 3.8. Distribusi tegangan dan regangan lentur pada balok beton bertulang yang diberi fiber (**Suhendro, 1991**).

Dari Gambar 3.8. terlihat bahwa regangan maximum yang dipakai pada beton serat adalah 0,0035 sedangkan pada beton normal adalah 0,003. Selain itu kekuatan

tarik beton pada beton serat tidak diabaikan. Kuat tarik bahan beton menurut SNI-03-2847-1992 adalah :

$$f_r = 0,50\sqrt{f'_c} - 0,60\sqrt{f'_c} \text{ (Mpa), untuk beton normal} \dots\dots\dots (3.32)$$

$$f_r = 0,40\sqrt{f'_c} - 0,50\sqrt{f'_c} \text{ (Mpa), untuk beton ringan} \dots\dots\dots (3.33)$$

Untuk beton serat, kuat desak meningkat sekitar 10% dibandingkan beton normal, dan kuat tarik beton serat meningkat $\pm 50\%$, **Suhendro (1994)**. Karena terjadi peningkatan kuat tarik yang cukup besar pada beton serat, maka diusulkan kuat tarik beton serat adalah 150% beton normal:

$$f_r = 0,75\sqrt{f'_c} - 0,90\sqrt{f'_c} \text{ (Mpa), rumus usulan beton serat} \dots\dots\dots (3.34)$$

dengan, f_r = kuat tarik beton, MPa

f'_c = kuat tekan beton, MPa

Gaya-gaya dalam adalah :

$$C_c = 0,67.f'_c.c.b \dots\dots\dots (3.35)$$

$$C_s = A'_s.f_y \dots\dots\dots (3.36)$$

$$T_{cf} = 0,85.f_m.0,85(h-c).b \dots\dots\dots (3.37)$$

$$T_s = A_s.f_y \dots\dots\dots (3.38)$$

Keseimbangan gaya-gaya dalam yaitu:

$$C_c + C_s - T_{cf} - T_s = 0 \dots\dots\dots (3.39)$$

Dari persamaan (3.39), diperoleh letak garis netral (c)

Kontrol regangan baja :

Regangan baja desak

$$\varepsilon'_s = (c - d')/c \times 0,0035 \dots\dots\dots (3.40)$$

Regangan baja tarik

$$\varepsilon_s = (d - c)/c \times 0,0035 \dots\dots\dots (3.41)$$

Kekuatan momen lentur nominal

$$M_{no} = T_s(d - c) + T_{cf}(h - c)/2 + C_c \cdot \frac{1}{8} \cdot c + C_s(c - d') \dots (3.42)$$

Notasi yang dipakai :

M_{no} = kekuatan momen lentur murni (N.mm),

T_s = resultante gaya tarik dari baja tarik (N),

d = tinggi efektif balok (mm),

d' = jarak dari serat tekan terluar ke pusat tulangan tekan (mm)

c = jarak garis netral ke serat terluar bagian desak (mm),

T_{cf} = resultante gaya tarik dari beton fiber (N),

h = tinggi total balok (mm),

C_c = resultante gaya desak dari beton fiber (N),

C_s = resultante gaya desak dari baja desak (N),

A_s = luas baja tulangan (mm²),

f'_{cf} = kuat desak beton fiber (Mpa),

f'_u = kuat tarik beton fiber (Mpa).

Dari persamaan (3.42) pada usulan **Suhendro** dan persamaan (3.40) pada beton normal terlihat perbedaan, dimana kekuatan momen lentur murni (M_{no}) untuk beton serat lebih besar daripada kekuatan momen lentur murni pada beton normal (M_n). Ini disebabkan karena kekuatan tarik pada beton serat diperhitungkan

3.8.3. Momen lentur beton bertulang yang diberi serat pasca bakar

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh **Anas Ibadilhaq dan Isnaini Jauhari (1998)**, nilai f'_c untuk balok pasca bakar variasi suhu 500°C mengalami penurunan sebesar 30,6409 %, sedangkan balok pasca bakar variasi suhu 600°C mengalami penurunan sebesar 39,4109 %. Oleh karena itu dapat diambil kesimpulan bahwa $f'_c < f'_c$, maka persamaan momen lentur nominal untuk balok fiber pasca bakar variasi suhu 500°C dan 600°C akan berubah menjadi:

Untuk balok fiber pasca bakar suhu 500°C

$$C_c = 0,67 \cdot (f'_c \cdot 69,3591\%) \cdot c \cdot b \dots \dots \dots (3.43)$$

$$M_{no} = T_s \cdot (d - c) + T_{cf} \cdot 0,5 \cdot (h - c) + (0,67 \cdot f'_c \cdot 69,3591\% \cdot c \cdot b) \cdot 5/8 \cdot c + C_s \cdot (c - d') \dots (3.44)$$

dan untuk balok fiber pasca bakar suhu 600°C

$$C_c = 0,67 \cdot (f'_c \cdot 60,5891\%) \cdot c \cdot b \dots \dots \dots (3.45)$$

$$M_{no} = T_s \cdot (d - c) + T_{cf} \cdot 0,5 \cdot (h - c) + (0,67 \cdot f'_c \cdot 60,5891\% \cdot c \cdot b) \cdot 5/8 \cdot c + C_s \cdot (c - d') \dots (3.46)$$

Jika persamaan (3.44) dan (3.46) dibandingkan dengan persamaan (3.42), kuat momen lentur nominal beton serat suhu ruangan lebih besar daripada kuat momen lentur nominal beton serat pasca bakar (M_{nk}), baik untuk suhu 500°C maupun suhu

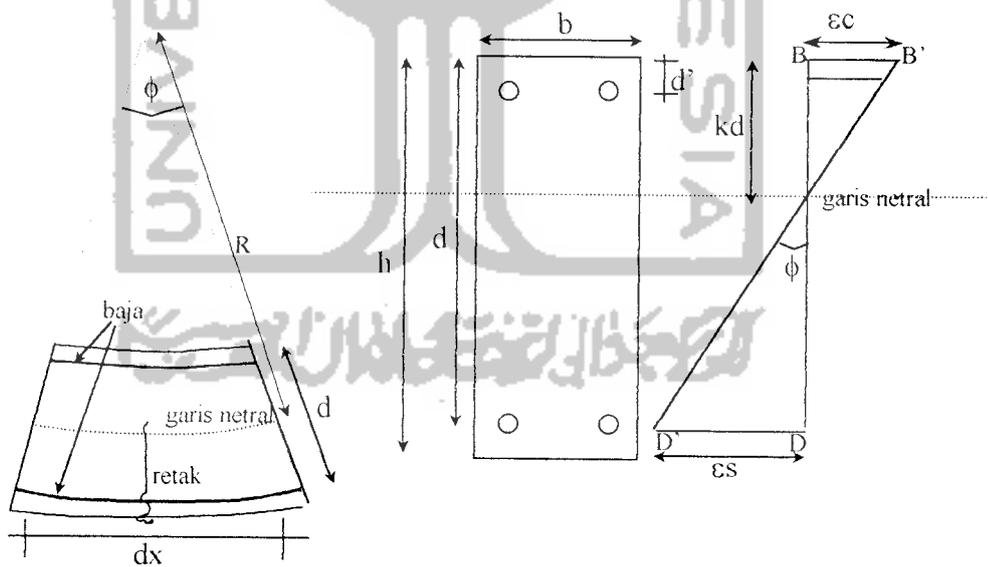
nominal beton serat pasca bakar (M_{fb}), baik untuk suhu 500°C maupun suhu 600°C . Ini disebabkan karena penurunan nilai kuat tekan beton (f_c') akibat kebakaran.

3.9. Momen-Kelengkungan Secara Teoritis

Perhitungan momen-kelengkungan secara teoritis menurut **Park and Pauley (1975)**, dinyatakan dalam tiga bagian yaitu:

3.9.1. Momen kelengkungan retak awal

Dengan mengambil sebuah elemen lurus dari sebuah balok beton bertulang dengan momen-momen ujung dan gaya axial yang sama seperti Gambar 3.9 jari-jari kelengkungan R diukur dari garis netral. Adanya retak-retak pada beton akibat terjadi penambahan tegangan akan merubah jari-jari kelengkungan (R), tinggi garis netral (C), regangan beton (ϵ_c) dan regangan baja tarik (ϵ_s).



Gambar 3.9. Kelengkungan balok

Untuk menghitung momen retak awal pada sebuah balok beton bertulang digunakan rumus kuat lentur balok dengan menganggap bahan homogen (serba sama) dan elastik:

$$M_{crack} = \frac{f_r \cdot I}{y_{bawah}} \dots \dots \dots (3.47)$$

dengan: M_{crack} = momen retak awal

$$f_r = \text{modulus retak} = 0,8 \sqrt{f_c'}$$

I = inersia balok

y_{bawah} = jarak dari garis netral ke tepi bawah balok

Menganggap sebuah elemen kecil dengan panjang dx dari balok dan menggunakan notasi seperti pada Gambar 3.9, maka rotasi diantara ujung-ujung dari elemen ditunjukkan dalam persamaan:

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

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

dengan $1/R = \phi$ maka:

$$\phi = \frac{\epsilon_c}{kd} = \frac{\epsilon_s}{d(1-k)} = \frac{\epsilon_c + \epsilon_s}{d} \dots \dots \dots (3.48)$$

dengan: ϕ = kelengkungan ε_c = regangan beton
 ε_s = regangan baja d = tinggi efektif penampang

Ini menunjukkan bahwa kelengkungan (ϕ) adalah gradien regangan dari elemen seperti dalam Gambar 3.9. Kelengkungan akan benar-benar berubah sepanjang bentang balok karena naik-turunnya garis netral dan regangan-regangan diantara retak-retak. Jika panjang elemen kecil, dan sebuah retak berakhir, kelengkungan dihitung dengan persamaan 3.48 untuk penampang ijin yang diperoleh dari hubungan momen-kelengkungan. Dua grafik yang diperoleh dari hitungan balok tulangan sebelah adalah lurus atau linear diawal, dan hubungan antara momen dan kelengkungan dalam persamaan:

$$EI = MR = \frac{M}{\phi} \dots \dots \dots (3.50)$$

dimana EI adalah kekakuan dari penampang. Dengan meningkatnya 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 linier sehingga sering juga ditampilkan grafik hubungan $M-\phi$ dalam bentuk bi-linear.

3.9.2. Momen-kelengkungan setelah retak pada saat leleh pertama

Pada Gambar 3.9 menunjukkan kasus umum dari sebuah penampang persegi tulangan ganda pada leleh pertama dari tegangan baja dan regangan ultimit beton.

Momen-kelengkungan pada saat leleh pertama dapat dicari dengan persamaan:

$$k = \left[(\rho - \rho')^2 n^2 + 2\left(\rho - \frac{\rho' d'}{d}\right) n \right]^{1/2} - (\rho - \rho') n \quad (3.51)$$

$$M_y = A'_s f'_s (c-d) + 0,67 f'_c \cdot c \cdot b \cdot c^2 + 0,85 f_y (0,85 (h-c) \cdot b \cdot 0,5 (h-c) \cdot A_s f_y (d-c) \quad (3.52)$$

$$\phi_y = \frac{\epsilon_s}{d-c} \quad (3.53)$$

Dengan: $c = k \cdot d$

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.

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

3.9.3. Momen-kelengkungan ultimit

Momen ultimit (M_u) dan kelengkungan ultimit (ϕ_u) dari penampang bertulangan rangkap (lihat Gambar 3.9) dalam persamaan :

$$a = \frac{A_s \cdot f_y - A'_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \dots \dots \dots (3.54)$$

$$M_u = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \cdot (d - a/2) + A'_s \cdot f_y \cdot (d - d') \dots \dots \dots (3.55)$$

$$\phi_u = \frac{\epsilon_c}{c} = \frac{\epsilon_c \cdot \beta_1}{a} \dots \dots \dots (3.56)$$

Regangan baja tekan yang ditunjukkan pada Gambar 3.9 dicari dengan persamaan:

$$\epsilon_s = \epsilon_c \left(\frac{c - d'}{c} \right) = \epsilon_c \left(1 - \frac{\beta_1 \cdot d'}{a} \right) \dots \dots \dots (3.57)$$

substitusi persamaan (3.54) ke persamaan (3.57) menunjukkan bahwa gaya tekan akan leleh ketika:

$$\epsilon_c \left[1 - \beta_1 \cdot d' \left(\frac{0,85 \cdot f'_c \cdot b}{A_s \cdot f_y - A'_s \cdot f_y} \right) \right] \geq \frac{f_y}{E_s} \dots \dots \dots (3.58)$$

Jika persamaan (3.58) kurang sesuai (baja tekan tidak leleh) maka nilai nyata dari tegangan baja dicari dengan persamaan:

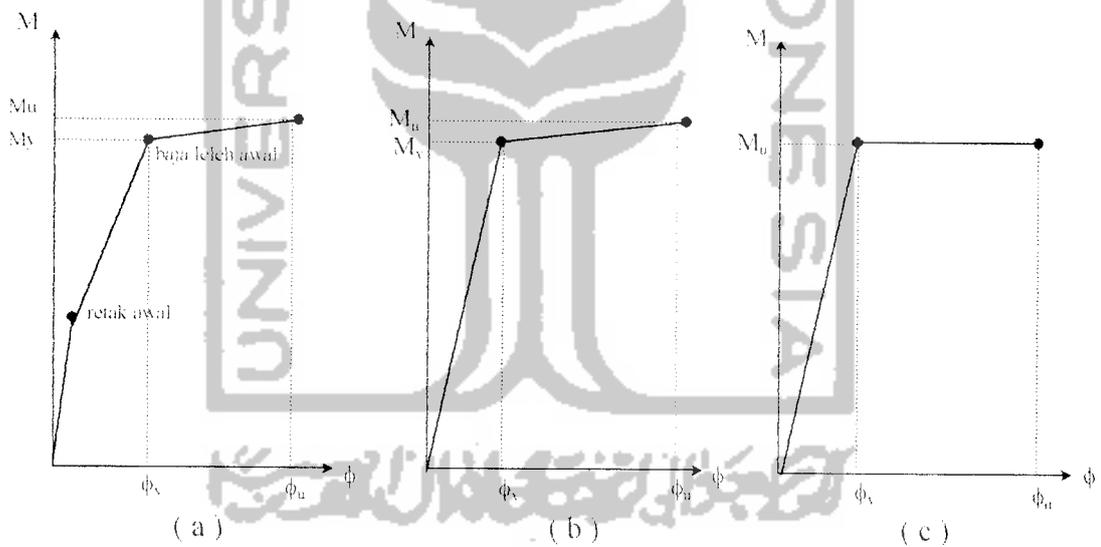
$$f'_s = \epsilon'_s E_s \dots \dots \dots (3.59)$$

maka momen ultimit dapat dicari dengan persamaan:

$$M_u = A_s f'_s (d - kd) + 0,85 f'_c 0,85 b (h - kd)^2 \cdot 0,5 + 0,67 f'_c kd b \cdot \frac{5}{8} kd + A'_s f'_s (kd - d') \dots \dots \dots (3.60)$$

dan kelengkungan ϕ_u dicari dengan persamaan (3.56).

Grafik momen kelengkungan untuk uji lentur ditunjukkan oleh Gambar (3.10)



Gambar 3.10. kurva momen-kelengkungan ideal

Keterangan Gambar 3.10. :

- (a) Grafik trilinear momen kelengkungan
- (b) Grafik bilinear momen kelengkungan dengan peningkatan momen
- (c) Grafik bilinear momen kelengkungan tanpa peningkatan momen