



## BAB II DASAR TEORI

### II.1. KARAKTERISTIK MATERIAL

Setiap material memiliki karakteristik sendiri - sendiri. Agar bisa mendesain struktur beton prategang sebagian dengan optimal kita harus mengenal terlebih dahulu perilaku dari setiap material yang biasa digunakan dalam balok beton prategang sebagian. Material yang digunakan dalam balok prategang sebagian adalah beton mutu tinggi, tendon baja prategang, dan tulangan baja biasa.

#### II.1.1. Mekanika Material

Dari semua properti yang menjadi ciri khas dari setiap material, kurva tegangan-regangan adalah kurva yang paling menarik. Kurva tegangan - regangan dari sebuah material memuat banyak informasi yang dapat kita tangkap ( tegangan maksimum, regangan maksimum, kuat tarik, kuat tekan, modulus elastisitas, elongnasi, dll ).

##### II.1.1.A. Tegangan

Sebuah gaya dan momen yang bekerja pada sebuah titik dari potongan penampang menghasilkan distribusi tegangan yang bekerja pada penampang tersebut. Tegangan dapat dipisahkan berdasarkan sumbu mana yang tegangan tersebut bekerja. Secara umum tegangan dapat dibagi antara tegangan normal dan tegangan geser.

Tegangan normal adalah tegangan yang diakibatkan oleh gaya yang bekerja pada sumbu normal penampang dimana

$$\sigma_z = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta A} \dots\dots\dots(1.1)$$

dimana jika gaya yang bekerja menyebabkan pertambahan pajang maka disebut gaya tarik, sedangkan bila gaya yang bekerja menyebabkan perpendekan batang maka disebut gaya tekan.

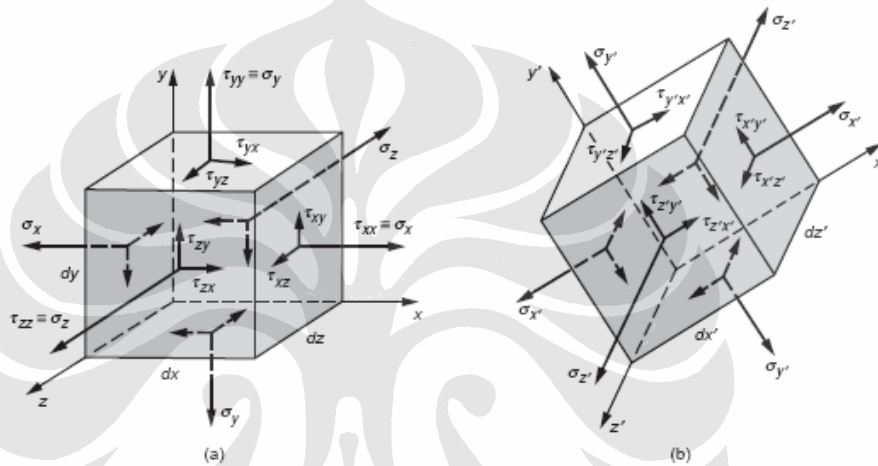


Tegangan geser adalah tegangan yang diakibatkan gaya yang bekerja pada sumbu tangensial penampang dimana

$$\tau_{zx} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_x}{\Delta A} \dots\dots\dots(1.2)$$

$$\tau_{zy} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_y}{\Delta A} \dots\dots\dots(1.3)$$

dapat dilihat bahwa antara tegangan normal dan tegangan geser hanya berbeda menurut sumbu mana tegangan itu bekerja.



**Gambar 2.1** Tegangan normal dan tegangan geser (a) pada sumbu global (b) pada sumbu lokal

*II.1.1.B. Regangan*

Ketika sebuah gaya bekerja pada sebuah benda, gaya tersebut akan cenderung mengubah bentuk dan ukuran dari benda tersebut. Akan tetapi perubahan yang terjadi tidak pada volume benda tersebut. Pada gaya tarik benda akan memanjang dan luas penampang akan mengecil, sedangkan pada gaya tekan benda akan memendek dan penampang akan membesar sehingga total volume benda tersebut akan tetap sama.

Regangan menggambarkan deformasi yang terjadi pada panjang dan sudut antara dua titik. Regangan normal adalah pertambahan panjang per satuan panjang dimana



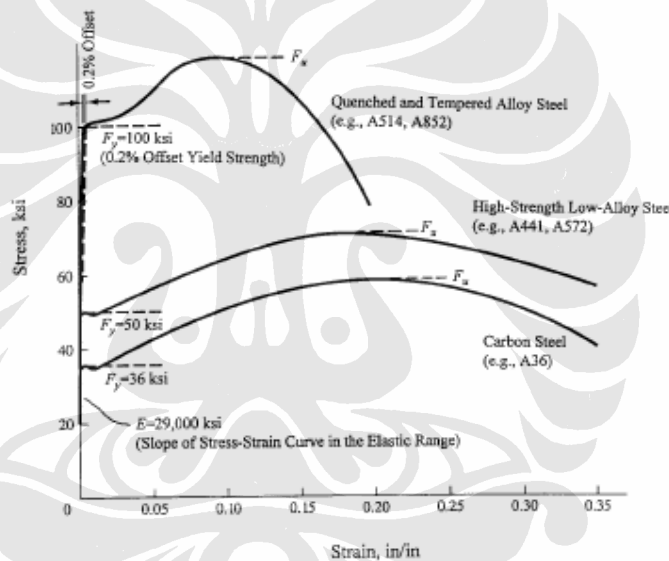
$$\varepsilon = \lim_{B \rightarrow A \text{ along } n} \frac{\Delta s' - \Delta s}{\Delta s} \dots\dots\dots(1.4)$$

dan regangan geser adalah perubahan sudut antara dua garis yang awalnya saling tegak lurus sebelum terjadinya deformasi.

$$\gamma_{nt} = \frac{\pi}{2} - \lim_{\substack{B \rightarrow A \text{ along } n \\ C \rightarrow A \text{ along } t}} \theta' \dots\dots\dots(1.5)$$

### II.1.1.C. Tegangan Regangan

Berdasarkan rumus tegangan regangan normal diatas kita dapat membuat grafik tegangan regangan. Grafik tegangan regangan untuk setiap material adalah unik. Dibawah akan dicoba dibahas grafik tegangan regangan untuk baja



**Gambar 2.2** Grafik tegangan regangan baja

Beberapa karakteristik material dapat dilihat dari grafik diatas :

1. perilaku elastis: perilaku elastis terjadi apabila tegangan yang terjadi masih dalam area elastis. Dimana pada daerah elastis ini kurva yang terbentuk adalah garis linier. Jadi pada pada daerah ini tegangan yang terjadi proporsional terhadap regangan yang terjadi. Titik akhir dari garis linier ini disebut dengan batas elastis.
2. leleh : tegangan yang terjadi sedikit diatas area elastis akan menyebabkan material berdeformasi secara permanen. Perilaku ini disebut dengan leleh.



Peristiwa leleh ini terjadi pada dua buah titik antara tegangan leleh bawah dimana tegangan tidak berubah tetapi regangan terus meningkat hingga titik leleh atas

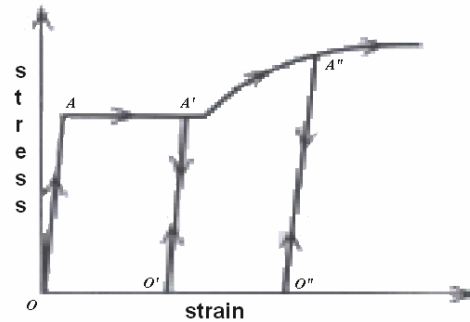
3. *strain hardening* : ketika material telah mencapai titik leleh atas tegangan dapat ditingkatkan dan menghasilkan kurva yang terus meningkat tetapi semakin datar hingga mencapai tegangan ultimate. Kurva tersebut disebut dengan *strain hardening*.
4. *necking* : setelah melewati tegangan ultimate kurva menurun hingga mencapai tegangan patah. Pada area kurva ini tegangan turun kemudian regangan bertambah tetapi luas permukaan berkurang pada sebuah titik. Hal ini yang disebut dengan *necking*.

Hubungan antara tegangan dan regangan dideskripsikan oleh Robert Hooke pada tahun 1676 yang dikenal dengan hukum Hooke. Hukum Hooke dapat diekspresikan dengan persamaan matematis

$$\sigma = E\varepsilon \dots\dots\dots(1.6)$$

dimana E adalah modulus young yang proportional pada daerah elastis. Pertama tegangan regangan akan bersifat elastis hingga titik leleh bila tegangan tidak mencapai tegangan leleh (titik A) maka regangan akan kembali ke titik awal (titik O). Pada daerah plastis persamaan 1.6 tidak lagi berlaku.

Untuk menggambarkan tegangan regangan pada daerah plastis kita dapat mempelajari fenomena *strain hardening*. Ketika material yang bersifat ductile dikenai pembebanan berulang (*loading unloading*). Apabila tegangan melewati titik leleh maka regangan akan bersifat inelastis. Pada saat *unloading* (titik A') maka regangan akan kembali secara sejajar dengan garis elastis tetap tidak kembali ke titik O tapi titik O', perbedaan antara titik O dan titik O' disebut regangan tetap (*permanent set*). Bila beban diberikan lagi maka regangan akan melalui garis O' menuju A' dan disini titik A' menjadi tegangan leleh yang baru. Bila beban melewati tegangan leleh yang baru maka regangan akan masuk ke dalam daerah plastis, demikian pula seterusnya.



Gambar 2.3 Grafik tegangan regangan untuk reserve loading

## II.1.2. Material Beton

### II.1.2.A. Pendahuluan

Beton adalah material yang umum digunakan pada konstruksi. Beberapa properties dari beton yang penting adalah :

1. Kuat terhadap tekan
2. Tahan lama dan tahan terhadap perubahan suhu
3. Tahan terhadap abrasi
4. Kuat terhadap perubahan lingkungan ( air laut, sulfat pada tanah, dll )

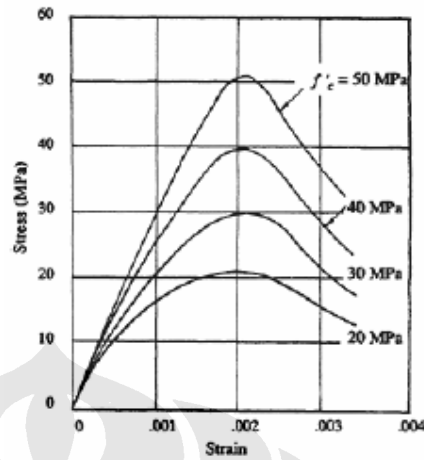
keunggulan lain dari beton adalah ketersediaan bahan baku beton di alam yang cukup mudah didapatkan di mana-mana. Hal ini yang membuat penggunaan beton bisa diaplikasikan di banyak tempat.

### II.1.2.B. Tegangan – Regangan Beton

Kuat tekan beton biasanya didapat dari silinder beton dengan ratio tinggi dengan diameter adalah 2. Silinder beton diberi gaya longitudinal dengan laju tegangan yang rendah hingga mencapai tegangan maksimum dalam waktu 2 – 3 menit. Silinder beton standar untuk pengujian adalah dengan tinggi 305 mm dan 152 mm diameter. Kuat tekan beton dites pada saat 28 hari. Kuat tekan beton berkisar antara  $13,8 - 55,2 \text{ N/mm}^2$



Grafik tegangan regangan beton seperti pada gambar dibawah ini



Gambar 2.4 Grafik tegangan regangan beton

umumnya kurva tegangan regangan beton mendekati linier sampai dengan setengah dari kuat tekan beton tetapi mendekati puncak dari kurva maka garis akan mendekati datar. Pada beton dengan mutu yang rendah maka puncak dari kurva tegangan dan regangan adalah datar.

Modulus elastisitas beton pada daerah elastis pada SNI dapat diambil sebesar

$$E_c = 4730 \sqrt{f'_c} \dots\dots\dots (1.7)$$

dengan tegangan ultimate pada beton bisa diambil sebesar

$$\sigma_u = 0.67 \frac{f_{cu}}{\gamma_m} N / mm^2 \dots\dots\dots (1.8)$$

dan regangan beton pada saat tegangan ultimate adalah sebesar

$$\varepsilon_y = 2.4 \times 10^{-10} \left( \frac{f_{cu}}{\gamma_m} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (1.9)$$

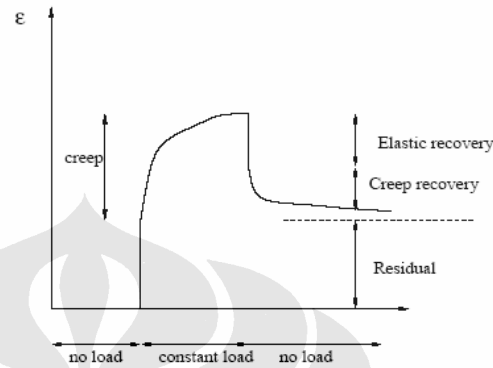
sedangkan perilaku tegangan regangan beton pada daerah plastis akan dibahas pada sub-bab selanjutnya

### II.1.2.C. Rangkak

Seiring dengan waktu beton yang terkena tegangan akan berangsur-angsur meningkat regangannya, hal ini dikarenakan deformasi rangkak dari beton. Biasanya pengaruh rangkak kecil pada kekuatan struktur, tetapi rangkak dapat



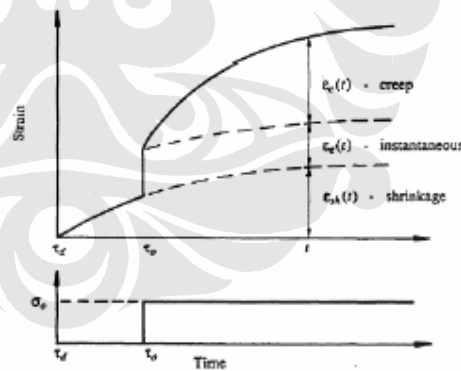
menyebabkan distribusi ulang dari tegangan pada saat beban layan, dan membuat lendutan menjadi lebih besar pada saat beban servis. Hal ini berarti rangkang dipengaruhi oleh faktor tegangan.



**Gambar 2.5** Grafik rangkang pada beton

#### II.1.2.D. Susut

Ketika beton kehilangan jumlah air dalam campuran akibat evaporasi, beton akan menjadi susut. Regangan susut tidak bergantung pada kondisi tegangan dari beton.



**Gambar 2.6** Grafik susut pada beton

Mengacu pada peraturan ACI regangan akibat susut dapat dihitung dengan persamaan

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{shu} S_t S_h S_{th} S_s S_f S_e S_c \dots \dots \dots (1.10)$$

dimana :

$\varepsilon_{sh}$  = regangan susut



- $\varepsilon_{shu}$  = rengangan susut ultimate  
 $S_t$  = koefisien waktu susut  
 $S_h$  = koefisien kelembapan relatif  
 $S_{th}$  = koefisien ketebalan  
 $S_s$  = koefisien slump dari beton  
 $S_f$  = koefisien kehalusan  
 $S_e$  = koefisien kandungan udara  
 $S_c$  = koefisien kandungan semen

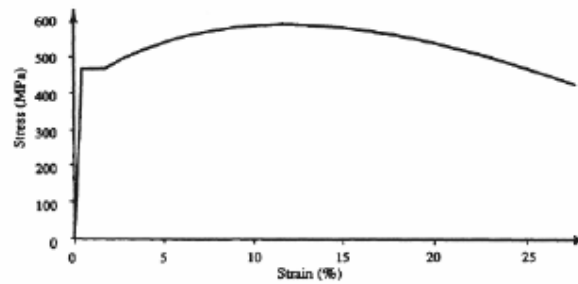
### II.1.3. Material Baja

#### II.1.3.A. Baja Tulangan

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa beton kuat terhadap tekan dan lemah terhadap tarik, oleh karena itu beton umumnya dipakai bersamaan dengan baja yang kuat terhadap tegangan tarik. Fungsi baja tulangan pada beton adalah :

1. untuk menambah kuat tarik dan daktilitas dari beton.
2. baja tulangan yang digunakan pada tulangan lentur berfungsi untuk menambah kuat lentur dari struktur
3. baja tulangan yang digunakan sebagai sengkang umumnya dirancang untuk menahan gaya tarik diagonal yang terdiri dari geser dan torsi.
4. untuk mengontrol retak lentur pada saat beban kerja pada balok beton prategang sebagian.
5. untuk mengontrol susut dan retak akibat temperatur pada daerah yang gaya prategang rendah.
6. untuk menahan gaya tekan pada saat kapasitas tekan beton tidak mencukupi.
7. untuk mengurangi lendutan jangka panjang dan perpendekan akibat rangkai dan susut.





**Gambar 2.7** Grafik tegangan regangan baja tulangan dengan mutu 420 Mpa.

### II.1.2.B. Kawat Baja Prategang

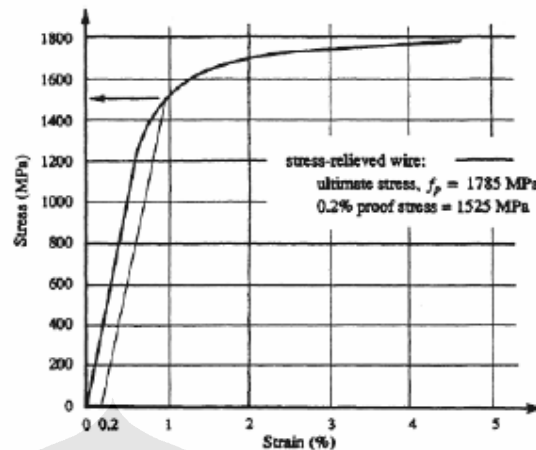
Perpendekan akibat beton yang diakibatkan oleh susut dan rangkai pada batang prategang menyebabkan kehilangan tegangan pada baja. Secara umum kehilangan gaya prategang berkisar antara 150 sampai 350 Mpa. Kehilangan gaya prategang dapat berasal dari sumber yang lain, seperti gaya gesek sepanjang tendon prategang atau penarikan angkur pada saat pemberian gaya pra-tegang.

Untuk efisiensi kehilangan gaya prategang harus relatif kecil dibanding dengan gaya awal prategang. Untuk ini baja yang digunakan untuk beton prategang harus mampu menahan gaya prategang awal yang sangat besar. Umumnya digunakan baja dengan kekuatan antara 1000 sampai 1900 Mpa.

Ada tiga jenis baja mutu tinggi yang umumnya digunakan untuk konstruksi beton prategang :

1. *cold-drawn, stress-relieved round wire;*

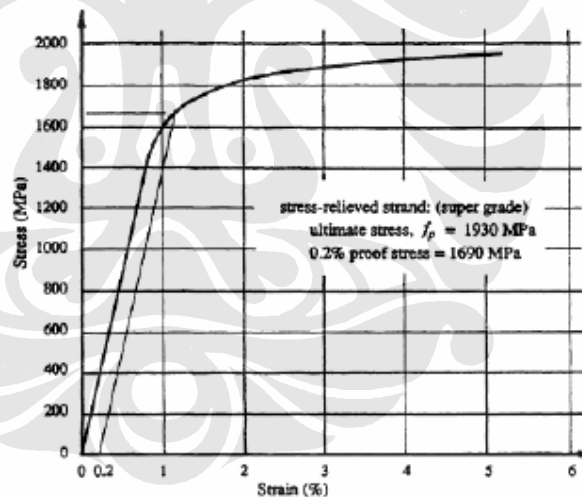
baja tipe ini diberikan perlakuan panas untuk meningkatkan kebutuhan kuat tarik ultimate, tegangan leleh, dan elongasi saat putus. Pada akhirnya ini baja tipe ini mulai digantikan dengan 7-wires



Gambar 2.8 Grafik tegangan wires dengan mutu 1785 Mpa.

2. *stress-relieved strand*;

baja tipe ini paling sering dipakai sebagai baja prategang. Properties mekanik dari *strand* berbeda dari jenis yang lain. Hal ini dikarenakan cenderung meningkat secara lurus ketika dikenai gaya tarik.



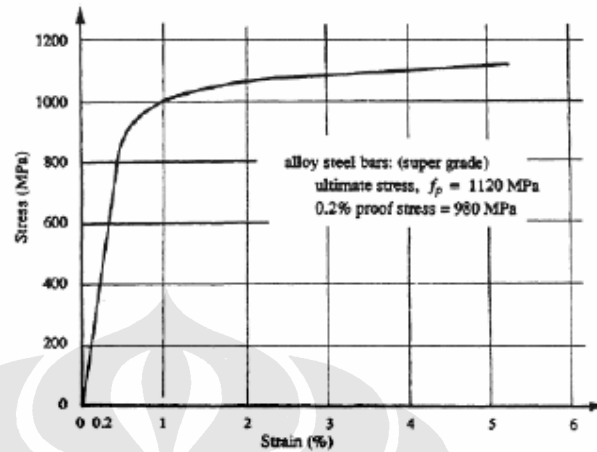
Gambar 2.9 Grafik tegangan regangan strand dengan mutu 1930 Mpa.

3. *high-strength alloy steel bars*.

baja ini didapatkan dengan meregangkan baja tulangan hingga didapatkan kuat tarik yang diinginkan. Dari diagram tegangan - regangan di bawah menunjukkan karakter yang mirip. Tidak adanya titik leleh yang jelas, elongnasi pada saat putus biasanya berkisar sekita 5 %. Dengan mutu baja lebih tinggi maka didapatkan daktilitas yang lebih rendah dari tulangan



baja nonprategang. Tapi daktilitas yang rendah ini masih memenuhi kriteria untuk desain.



Gambar 2.10 Grafik tegangan - regangan bars dengan mutu 1120 Mpa.

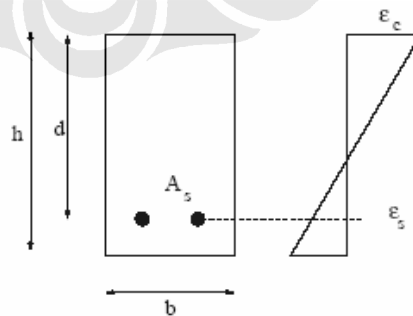
## II.2. KUAT LENTUR PENAMPANG

### II.2.1. Beton Bertulang

Teori kuat lentur untuk beton bertulang berdasarkan pada tiga asumsi:

1. penampang tegak lurus terhadap sumbu lentur.
2. tegangan pada tulangan sama besarnya dengan tegangan pada beton
3. tegangan pada beton dan tulangan dapat dihitung dari diagram tegangan - regangan untuk beton dan baja.

#### II.2.1.A. Penampang Tidak Retak



Gambar 2.11 Diagram regangan beton bertulang tidak retak

Pada penampang tidak retak kita mengasumsikan terjadinya lekatan sempurna antara baja dan beton, sehingga kita memiliki  $\varepsilon_s = \varepsilon_c$

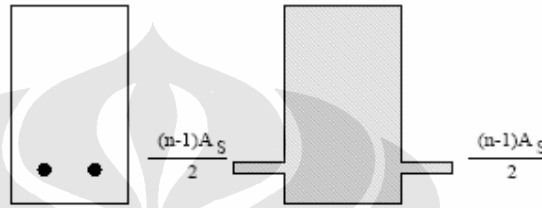


$$\varepsilon_s = \varepsilon_c \rightarrow \frac{f_s}{E_s} = \frac{f_c}{E_c} \rightarrow f_s = \frac{E_s}{E_c} f_c \rightarrow f_s = n f_c \dots \dots \dots (2.1)$$

dimana

$$n = \frac{E_s}{E_c} \dots \dots \dots (2.2)$$

gaya tarik pada baja  $T_s = A_s f_s = A_s n f_c$ ; baja diganti dengan penampang beton ekuivalen ( penampang ekuivalen )



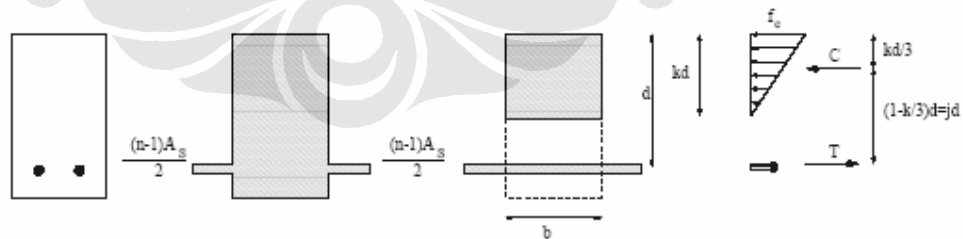
Gambar 2.12 Penampang transformasi

Penampang homogen akibat lentur

$$f_c = \frac{Mc}{I} \rightarrow f_s = n f_c \dots \dots \dots (2.2)$$

II.2.1.B. Penampang Retak

Pada analisa penampang retak kita mengasumsikan retak pada penampang berkembang ke garis netral, dan kita menuju menggunakan penampang traformasi.



Gambar 2.13 Diagram tegangan penampang retak elastis.

letak garis netral bergantung pada geometris dan n

gaya tarik dan tekan sama dengan  $C = \frac{bkd}{2} f_c$  &  $T = A_s f_s$  lim  $x \rightarrow \infty$  dan garis netral

dapat dihitung menurut momen dari area tarik dan momen dari area tekan.

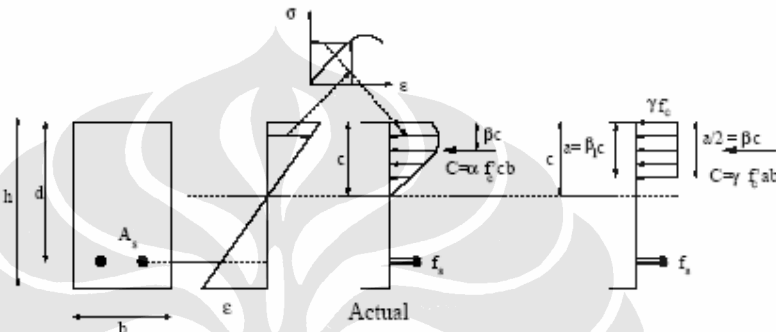


$$b(kd) \left( \frac{kd}{2} \right) = nA_s (d - kd) ; \quad M = Tjd = A_s f_s jd \rightarrow f_s = \frac{M}{A_s jd} ;$$

$$M = Cjd = \frac{bkd}{2} f_c jd = \frac{bd^2}{2} kj f_c \Rightarrow f_c = \frac{M}{\frac{1}{2} bd^2 kj} \dots\dots\dots (2.3)$$

; dimana  $j = \left(1 - \frac{k}{3}\right)$

II.2.1.C. Kuat Batas



Gambar 2.14 Diagram tegangan penampang retak metode kuat batas

Pada saat patah kita memiliki distribusi tegangan yang non linier. Ada dua cara untuk mendapatkan nilai distribusi tegangan pada daerah non linier. Pertama menggunakan analisa eksak, kedua dengan cara menggantikan diagram tegangan dengan nilai yang sama tetapi lebih simpel.

Untuk metode yang pertama akan dibahas pada sub-bab selanjutnya, metode kedua distribusi tegangan ekuivalen.

$$C = \alpha f'_c b c = \gamma f'_c a b \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\alpha = \frac{f_{av}}{f'_c}$$

$$a = \beta_1 c$$

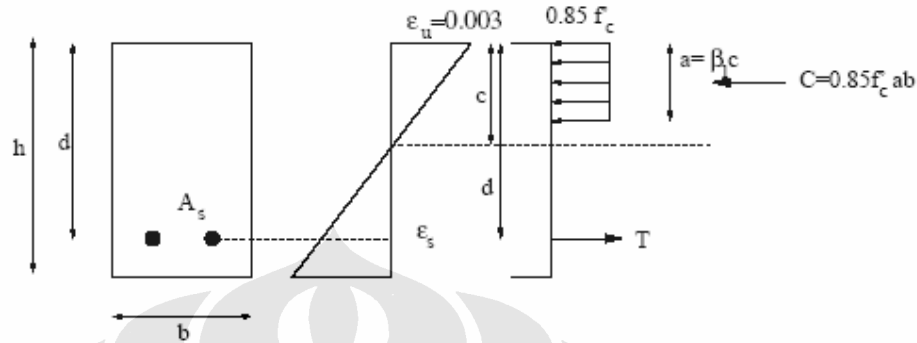
$$\gamma = \frac{\alpha}{\beta_1}$$

tetapi lokasi dari resultan gaya harus sama,  $\beta_1 = 2\beta$

dari data eksperimen yang dimuat pada ACI kita bisa mendapatkan nilai  $\beta_1$  dari rumus dibawah ini :



$$\beta_1 = 0.85 \quad \text{if } f'_c \leq 4000$$
$$\beta_1 = 0.85 - (0.05)(f'_c - 4000) \frac{1}{1000} \quad \text{if } 4000 < f'_c < 8000$$

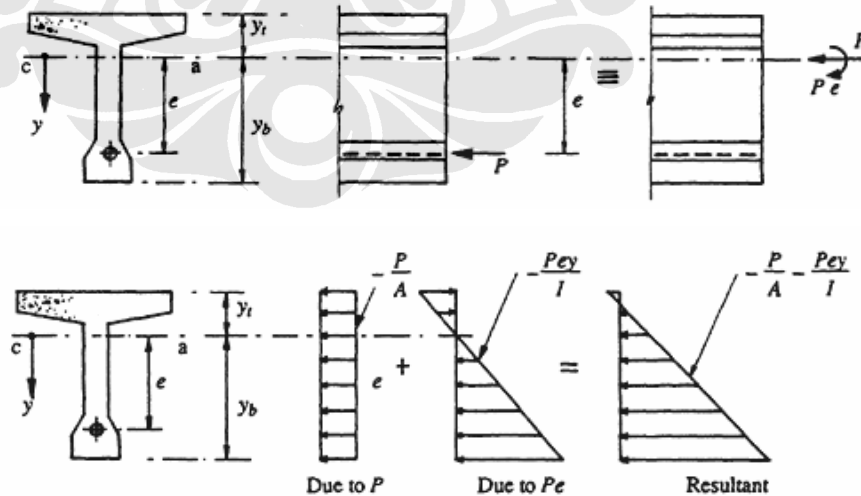


Gambar 2.15 Diagram tegangan penampang retak metode kuat batas 2

### II.2.2. Beton Prategang Penuh

Distribusi tegangan pada penampang beton prategang yang disebabkan oleh gaya prategang, berat sendiri dan beban kerja bisa dihitung terpisah dan dijumlahkan untuk mendapatkan tegangan distribusi tegangan kombinasi pada tahap pembebanan tertentu.

#### II.2.2.A. Tegangan Akibat Sistem Pra-tegang



Gambar 2.16 Diagram tegangan penampang akibat sistem pra-tegang



Besarnya tegangan akibat gaya prategang yang memiliki eksentrisitas seperti pada gambar diatas diekspresikan dengan rumus

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Pe_y}{I};$$
 dimana A dan I adalah luas area dan momen inersia terhadap

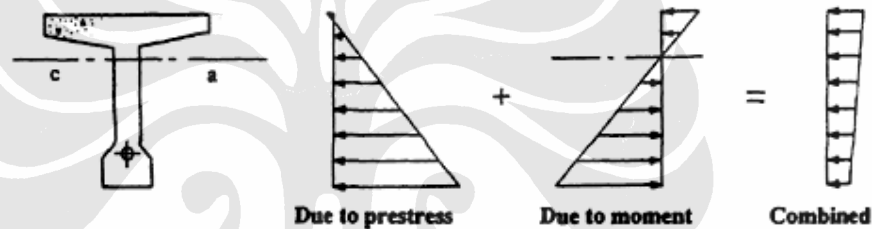
sumbu x dari titik berat penampang, dan y adalah jarak terhadap titik berat.

### II.2.2.B. Tegangan Akibat Beban

Tegangan elastis akibat momen pada penampang tidak retak adalah

$$\sigma = \pm \frac{My}{I}$$
 sehingga kombinasi distribusi tegangan akibat gaya prategang dan

momen yang bekerja adalah 
$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Pe_y}{I} \pm \frac{My}{I}$$

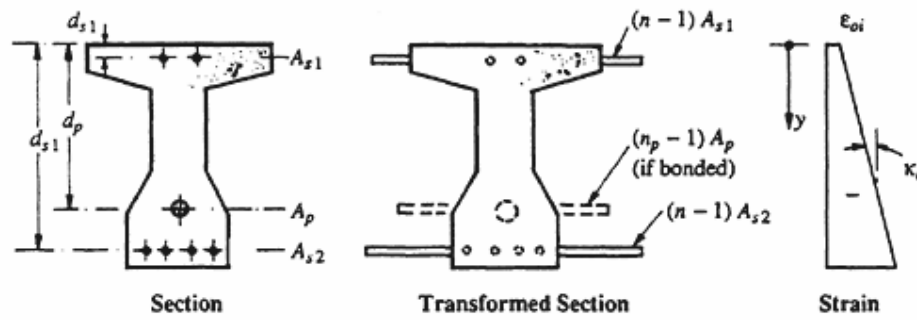


Gambar 2.17 Diagram tegangan kombinasi

### II.2.3. Beton Prategang Sebagian

#### II.2.3.A. Penampang Tidak Retak

Perilaku dari penampang balok prategang sebagian pada jangka waktu yang pendek dalam diketahui dengan mentransformasikan tulangan lekat menjadi luas yang ekuivalen terhadap beton dan menganalisa secara elastis pada penampang transformasi.



Gambar 2.18 Penampang transformasi pada saat pemindahan gaya pra-tegang

Posisi dari dari garis tengah penampang bervariasi terhadap waktu bergantung pada susut dan rangkang yang terjadi. Garis tengah penampang juga bergantung pada kualitas lekatan dari tulangan dan mungkin mengubah posisi ketika tendon tidak terlekat di grouting. Karena itu cocok untuk memilih titik referensi yang bisa digunakan untuk semua tahap pembebanan pada saat analisa. Pada gambar diatas penampang baja non prategang di transformasi ke luar beton

$A_s \frac{E_s}{E_c}$ ; jika baja prategang juga melekat dengan beton maka luas penampangnya

juga harus ditransformasi. Diagram tegangan pada titik dengan jarak  $y$  pada tepi atas penampang  $\epsilon_{oi}$  dan kurva awal  $x_i$  adalah

$$\epsilon_i = \epsilon_{oi} + yx_i$$

jika diasumsikan pada saat ini beton berperilaku secara linear elastis, maka tegangan awal beton pada jarak  $y$  di serat atas adalah

$$\sigma_i = E_c \epsilon_i = E_c (\epsilon_{oi} + yx_i) \dots \dots \dots (2.5)$$

dimana  $N_i = P_i$

maka  $N_i = \int \sigma_i dA$

$$N_i = E_c \epsilon_{oi} A + E_c x_i B$$

$A (= \int dA)$  adalah luas dari penampang transformasi dan  $B (= \int y dA)$  adalah momen inersia dari penampang transformasi terhadap permukaan atas penampang.





$$M_i = M_o - P_i d_p$$

dan  $M_i = \int \sigma_i y dA$

$$N_i = E_c \varepsilon_{oi} B + E_c x_i \bar{I}$$

dimana ( $\bar{I} = \int y^2 dA$ ) terhadap permukaan atas pada penampang transformasi

dari persamaan diatas didapat

$$\varepsilon_{oi} = \frac{BM_i - \bar{I}N_i}{E_c (B^2 - A\bar{I})}; \dots\dots\dots (2.6)$$

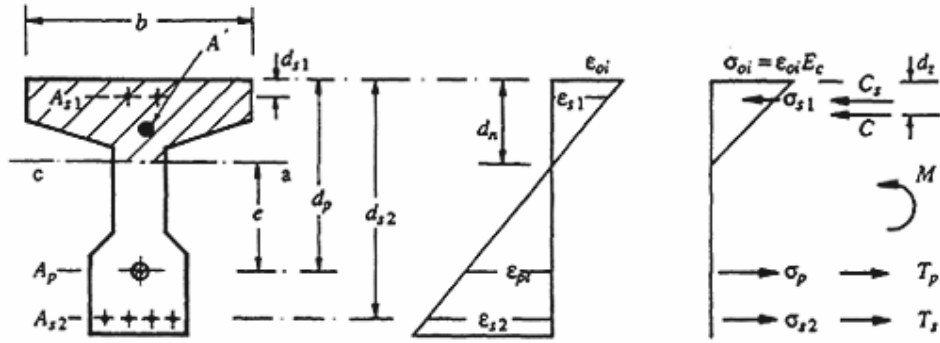
$$x_i = \frac{BN_i - \bar{I}N_i}{E_c (B^2 - A\bar{I})}$$

### II.2.3.B. Penampang Retak

Ketika tegangan tarik yang dihasilkan dari moment dalam pada beberapa potongan penampang menjadi tekan dikarenakan gaya prategang, dan tegangan pada serat kritis mencapai kekutan dari beton , maka retak terjadi. Momen pada saat retak terjadi disebut dengan momen retak. Untuk menghitung momen retak secara elastis bisa kita lakukan dengan mengasumsikan

1. potongan penampang berbentuk sama
2. lekatan sempurna antara beton dan baja baik baja prategang maupun baja tulangan.
3. perilaku material seketika adalah linier elastis. Hal ini termasuk beton dalam tekan.
4. hanya diperlukan perilaku jangka waktu pendek, analisa tidak termasuk efek inelastis dari susut dan rangkakan.
5. tegangan tarik pada beton diabaikan.

asumsi diatas adalah hal yang bisa diterima pada saat beban layang.



Gambar 2.19 Analisa penampang retak

$C$  adalah volume dari blok tegangan segitiga tekan yang bekerja pada area  $A'$  dibagian atas dari garis netral. Jika  $A'$  adalah persegi ( $b$  wide and  $d_n$  deep), maka

$$C = \frac{1}{2} \sigma_{oi} b d_n = \frac{1}{2} E_c \varepsilon_{oi} b d_n \dots\dots\dots$$

(2.7)

maka gaya pada tulangan baja adalah

$$T_s = \sigma_{s2} A_{s2} = E_s A_{s2} \frac{-\varepsilon_{oi} (d_{s2} - d_n)}{d_n} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$C_s = \sigma_{s1} A_{s1} = E_s A_{s2} \frac{-\varepsilon_{oi} (d_n - d_{s1})}{d_n}$$

regangan pada baja prategang terlekat adalah sama dengan jumlah dari regangan tiga komponen

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{pe} + |\varepsilon_{ce}| + \varepsilon_{pt}$$

$$\varepsilon_{pe} = \frac{P_e}{A_p E_p}$$

$$\varepsilon_{ce} = \frac{1}{E_c} \left( -\frac{P_e}{A} - \frac{P_e e^2}{I} \right)$$

$$\varepsilon_{pt} = \frac{-\varepsilon_{oi} (d_p - d_n)}{d_n}$$

maka didapat

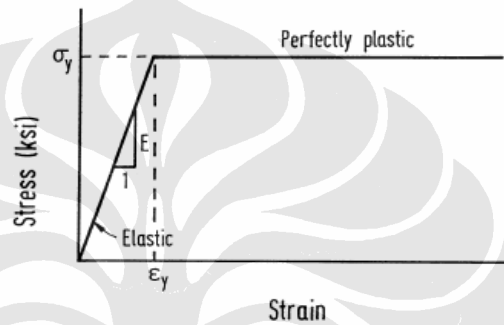
$$T_p = E_p A_p \left( \varepsilon_{pe} + |\varepsilon_{ce}| + \frac{-\varepsilon_{oi} (d_p - d_n)}{d_n} \right) \dots\dots\dots (2.9)$$



### II.3. NON LINIERITAS MATERIAL

#### II.3.1. Daktilitas

Analisa plastis atau non linier dapat langsung diterapkan pada material yang dapat berdeformasi cukup besar tanpa patah. Baja adalah salah satu material yang dapat diidealisasikan memiliki grafik tegangan regangan seperti gambar di bawah ini.

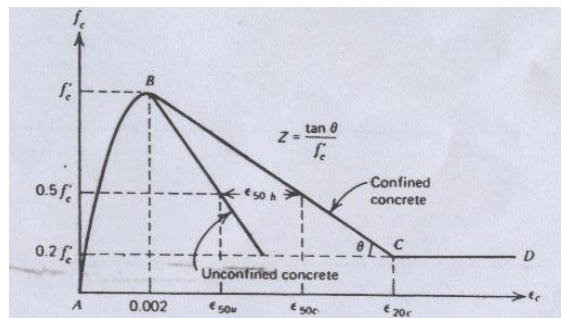


Gambar 2.20. Grafik tegangan – regangan material yang daktilitasnya baik.

Pada baja yang diberi gaya tarik, baja akan berelongsasi elastis hingga mencapai titik leleh. Hal ini kemudian diikuti oleh kenaikan regangan tanpa kenaikan tegangan yang berarti. Patah akan terjadi setelah baja berdeformasi cukup lama. Idealisasi material seperti ini disebut dengan elastis-plastis.

#### II.3.2. Non linieritas dari Beton

Kurva umum dari tegangan regangan beton adalah seperti yang telah dibahas pada sub-bab sebelumnya. Di sub-bab ini kita akan membahas rumusan tegangan – regangan beton. Salah satu pendekatan yang paling umum adalah yang dilakukan Robert Park, rumusannya adalah sebagai berikut





**Gambar 2.21.** Grafik tegangan – regangan beton dengan pendekatan Park.

dimana  $f_c'$  dalam psi

1. untuk kondisi  $\varepsilon \leq \varepsilon'_c$

$$f_c = f_c' \left[ \frac{2\varepsilon_c}{0.002} - \left( \frac{\varepsilon_c}{0.002} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (3.1)$$

2. untuk kondisi  $\varepsilon'_c \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u$

$$f_c = f_c' [1 - Z(\varepsilon_c - 0.002)] \dots\dots\dots (3.2)$$

$$\text{dimana } Z = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} + \varepsilon_{50h} - 0.002}$$

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3 + 0.002 f_c'}{f_c' - 1000}$$

$$\varepsilon_{50h} = \frac{3}{7} \rho_s \sqrt{\frac{b''}{s_h}}$$

### II.3.3. Non Linieritas dari Baja Prategang

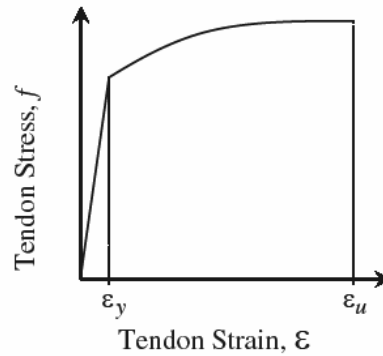
#### II.3.3.A. Tendon 250 Ksi Strand

Parameter yang digunakan :

1.  $\varepsilon$  = regangan dari tendon
2.  $f$  = tegangan dari tendon
3.  $E$  = modulus elastisitas
4.  $\varepsilon_y$  = regangan leleh dari tendon
5.  $\varepsilon_u$  = regangan batas dari tendon

dimana  $\varepsilon_u$  diambil sebesar 0.03 dan  $\varepsilon_y$  didapatkan dengan cara memecahkan

persamaan kuadrat  $E\varepsilon_t^2 - 250\varepsilon_y + 0.25 = 0$



**Gambar 2.22.** Grafik tegangan – regangan tendon.

3. untuk kondisi  $\varepsilon \leq \varepsilon_y$

$$f = E\varepsilon \dots\dots\dots (3.3)$$

4. untuk kondisi  $\varepsilon_y \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u$

$$f = 250 - \frac{0.25}{\varepsilon} \dots\dots\dots (3.4)$$

**II.3.3.B. Tendon 270 Ksi Strand**

Pada Tendon 270 Ksi persamaan yang kita pecahkan untuk mendapatkan nilai  $\varepsilon_y$  adalah  $E\varepsilon_y^2 - (270 + 0.007E)\varepsilon_y + 1.93 = 0$

1. untuk kondisi  $\varepsilon \leq \varepsilon_y$

$$f = E\varepsilon$$

2. untuk kondisi  $\varepsilon_y \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u$

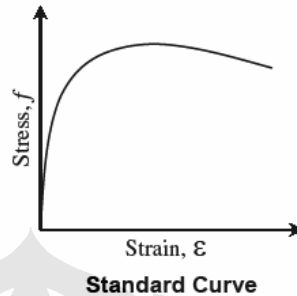
$$f = 270 - \frac{0.04}{\varepsilon - 0.007} \dots\dots\dots (3.5)$$

**II.3.4. Non Linieritas dari Baja Non Prategang**

Seperti dibahas sebelumnya mengenai tegangan – regangan dari baja nonprategang. Di sub - bab ini kita akan lebih melihat lebih jelas pada daerah inelastis dari baja non prategang atau baja tulangan.



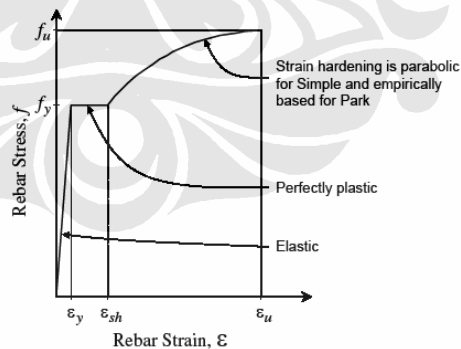
Pendekatan grafik tegangan - regangan dapat dilakukan dengan dua cara. Cara pertama adalah pendekatan sederhana dan cara kedua adalah cara yang telah diuraikan oleh Park.



**Gambar 2.23.** Grafik tegangan – regangan tulangan.

parameter yang digunakan :

1.  $\epsilon$  = regangan dari tulangan
2.  $f$  = tegangan dari tulangan
3.  $E$  = modulus elastisitas
4.  $f_y$  = tegangan leleh dari tulangan
5.  $f_u$  = tegangan batas dari tulangan
6.  $\epsilon_{sh}$  = tegangan pada saat *strain hardening*
7.  $\epsilon_u$  = regangan ultimate pada tulangan



**Gambar 2.24.** Grafik tegangan – regangan tulangan pendekatan Park.

1. untuk kondisi  $\epsilon < \epsilon_y$  ( daerah elastis )

$$f = E\epsilon$$

2. untuk kondisi  $\epsilon_y < \epsilon < \epsilon_{sh}$  ( daerah plastis sempurna )

$$f = f_y \dots\dots\dots (3.6)$$



3. untuk kondisi  $\epsilon_{sh} < \epsilon < \epsilon_u$  (daerah *strain hardening* )

a. untuk pendekatan sederhana

$$f = f_y + (f_u - f_y) \sqrt{\frac{\epsilon - \epsilon_{sh}}{\epsilon_u - \epsilon_{sh}}} \dots\dots\dots (3.7)$$

b. untuk pendekatan Park

$$f = f_y \left( \frac{m(\epsilon - \epsilon_{sh}) + 2}{60(\epsilon - \epsilon_{sh}) + 2} + \frac{(\epsilon - \epsilon_{sh})(60 - m)}{2(30r + 1)^2} \right) \dots\dots\dots (3.8)$$

dimana :  $r = \epsilon_u - \epsilon_{sh}$

$$m = \frac{\left( \frac{f_u}{f_y} \right) (30r + 1)^2 - 60r - 1}{15r^2}$$

dan nilai  $\epsilon_u = 0.09$  untuk  $A_s \leq 1.4 \text{ in}^2$

$\epsilon_u = 0.06$  untuk  $A_s > 1.4 \text{ in}^2$

$\epsilon_{sh} = 0.015$  untuk  $A_s \leq 0.85 \text{ in}^2$

$\epsilon_{sh} = 0.0125$  untuk  $0.85 \leq A_s \leq 1.15 \text{ in}^2$

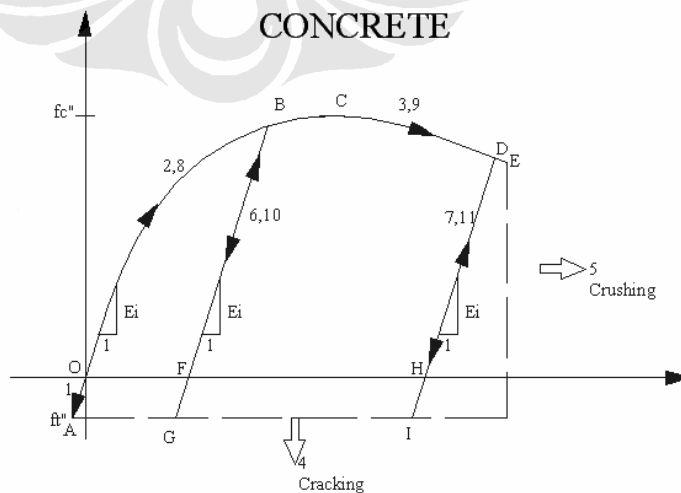
$\epsilon_{sh} = 0.0115$  untuk  $1.15 \leq A_s \leq 1.8 \text{ in}^2$

$\epsilon_{sh} = 0.0075$  untuk  $1.8 \leq A_s \leq 3 \text{ in}^2$

$\epsilon_{sh} = 0.005$  untuk  $A_s \geq 3 \text{ in}^2$

### II.3.5. Tahapan Non Linieritas Material Pada Program

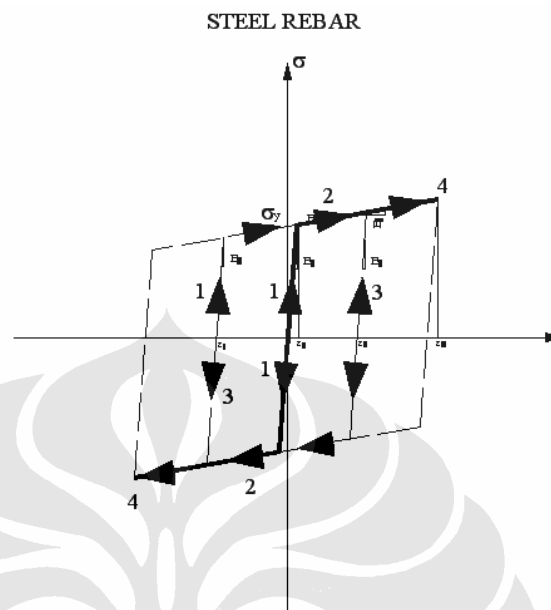
#### II.3.5.A. Beton



Gambar 2.25. Tahapan non linieritas material beton.

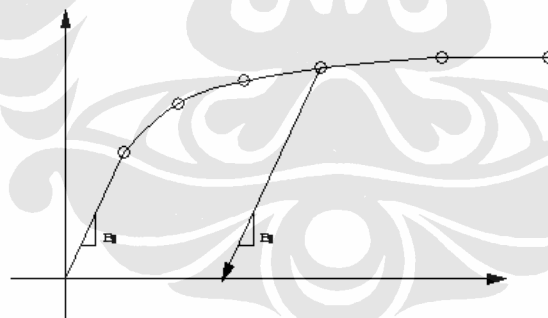


### II.3.5.B. Baja Tulangan



Gambar 2.26. Tahapan non linieritas material baja tulangan.

### II.3.5.C. Baja Prategang

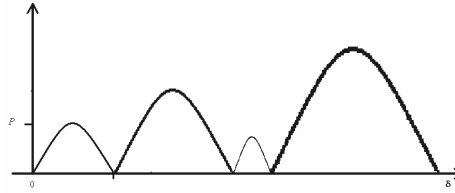


Gambar 2.27. Tahapan non linieritas material baja prategang.

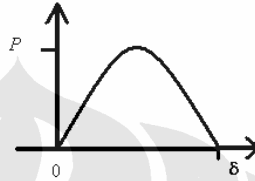
## II.4. BEBAN SEMI SIKLIK

Beban semi siklik di sini adalah beban statik segitiga yang berulang. Dimana amplitudo dari beban ini tidak beraturan seperti terlihat pada gambar 2.25. Hal ini dapat kita sederhanakan beban tersebut dengan mengambil satu beban semi siklik yang tidak beraturan ini menjadi satu buah bentuk beban loading dan unloading seperti pada gambar 2.26..





Gambar 2.28. Beban semi siklik



Gambar 2.29 Beban semi siklik yang disederhanakan

dalam hal ini kita dapat menganalisa struktur yang dikenai satu beban loading-unloading yang sederhana tetapi berulang kali. Dimana respon terakhir dari beban  $n$  menjadi kondisi awal untuk analisa struktur akibat beban  $n+1$  demikian seterusnya.

## II.5. TIPE ANALISA PROGRAM

Dalam program PCF3D terdapat 4 tipe analisis yang dapat kita gunakan, tipe analisa tersebut adalah :

1. Analisa linier
2. Analisa non linier material dengan peralihan yang kecil
3. Analisa non linier geometri dengan material elastis
4. Analisa non linier material dengan non linier geometri

Penggunaan tipe analisa bergantung pada kasus yang dihadapi. Perbedaan tipe analisis dibahas pada sub-bab dibawah ini. Sedangkan untuk analisa non-linier terdapat dua tipe kontrol perhitungan yaitu kontrol lendutan dan kontrol beban

### II.5.1. Linier Material dan Non linier material

Pada analisa linier kita menggunakan persamaan hukum Hooke sesuai persamaan 1.6, konsekuensi dari menggunakan persamaan ini adalah bahwa tidak



ada kondisi dimana material menjadi leleh, putus, dsb. Pada analisa non linier persamaan tegangan regangan yang digunakan sesuai kurva nonlinieritas material.

### **II.5.2. Geometri Linier dan Geometri Non linier**

Pada analisa linier geometri kita menganggap bahwa penampang yang terkena tegangan mengalami deformasi yang sangat kecil sehingga analisa orde pertama saja yang diperhatikan, sedangkan pada geometri yang non linier kita menganggap bahwa penampang yang terkena tegangan mengalami deformasi yang besar sehingga deformasi yang terjadi mempengaruhi tegangan dan regangan yang terjadi pada penampang. Untuk itu analisa dengan orde pertama sudah tidak memadai.

### **II.5.3. Kontrol Lendutan dan Kontrol Gaya**

Kontrol gaya berarti bahwa iterasi yang dilakukan berdasarkan gaya sedangkan kontrol lendutan berarti iterasi yang dilakukan berdasarkan pada lendutannya. Untuk setiap material terdapat beban ultimate. Untuk material linier beban batas adalah beban maksimum yang dapat diterima oleh material, sedangkan pada material non linier setelah beban ultimate material masih belum gagal tetapi masih dapat menerima beban yang besarnya berkurang dari beban batas. Analisa non-linier menjadi lebih akurat apabila digunakan kontrol lendutan.