

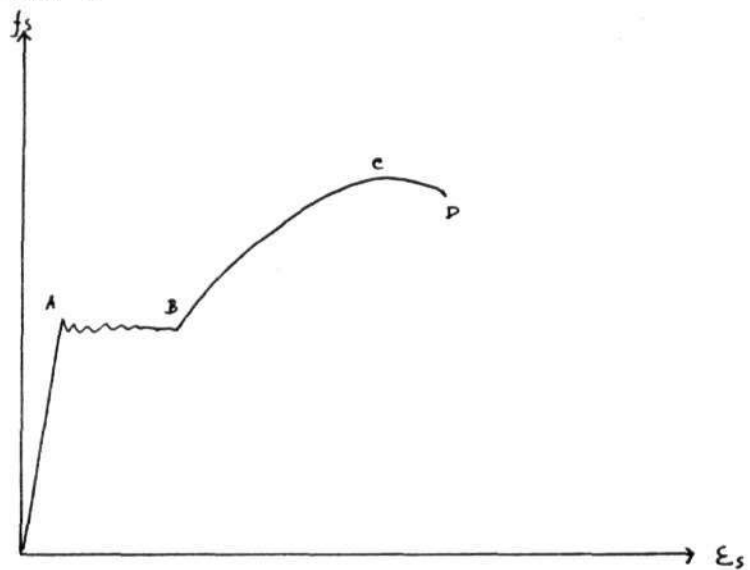
II. HUBUNGAN TEGANGAN-REGANGAN BAJA TULANGAN DAN BAJA PRATEGANG

1. BAJA TULANGAN

1.1 HUBUNGAN TEGANGAN-REGANGAN MONOTON

Hubungan tegangan-regangan baja tulangan yang diperoleh dari hasil test tarik monoton (selanjutnya hubungannya disebut hubungan tegangan-regangan monoton). Seperti yang ditunjukkan pada gambar

2.1 .



Gambar 2.1 Hubungan tegangan -regangan baja tulangan aktual

Kurva awal sampai titik leleh A menunjukkan daerah elastis linier. Setelah mencapai titik leleh A baja tulangan mengalami penambahan regangan dengan sedikit atau tanpa adanya penambahan tegangan, sampai pada titik B. Kemudian baja tulangan memasuki daerah "strain hardening", dimana penambahan regangan diikuti oleh penambahan tegangan yang cukup besar dan hal ini terus berlangsung sampai mencapai tegangan maksimum pada titik C. Melewati titik C, penambahan regangan akan menyebabkan turunnya tegangan secara drastis sampai putus di titik D.

Tegangan pada titik A menunjukkan tegangan lelehnya dan merupakan suatu parameter yang sangat penting dari baja tulangan. Biasanya kurva tegangan-regangan menunjukkan dengan jelas tegangan leleh atas dan tegangan leleh bawah. Besar relatif titik leleh atas bergantung pada kecepatan pengetesan, bentuk penampang dan keadaan dari contoh baja tulangan. Titik leleh bawah biasanya dianggap sebagai parameter yang benar dan dipakai untuk menentukan tegangan leleh baja tulangan.

Panjang "yield plateau" secara umum merupakan suatu fungsi dari tegangan baja. Baja "high-strength high-carbon" biasanya mempunyai "yield plateau" yang lebih pendek dan total regangan yang

lebih kecil sebelum putus jika dibandingkan dengan baja "lower-strength lower-carbon".

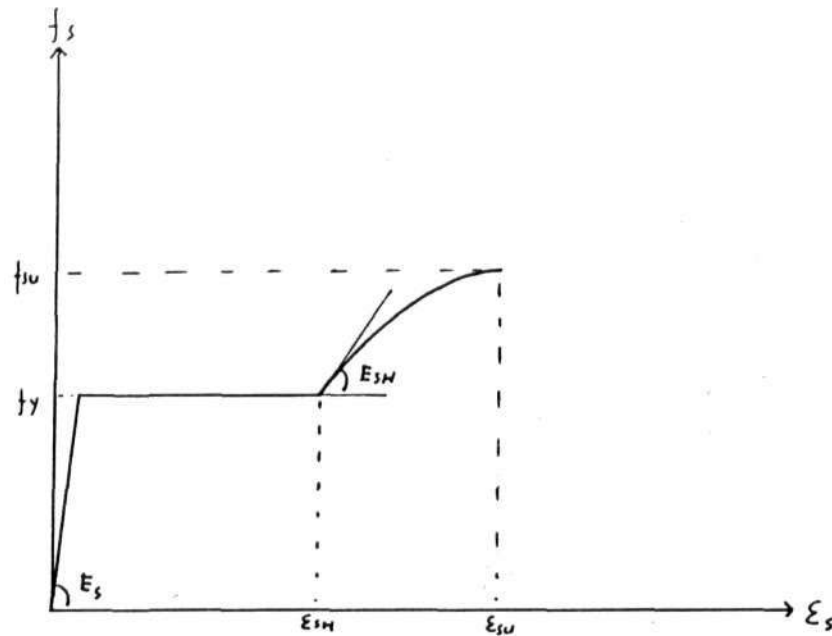
Hubungan tegangan-regangan yang diperoleh dari hasil test tarik dapat diasumsikan cukup baik untuk mewakili hubungan tegangan-regangan untuk baja tulangan akibat tekan[7]. Dari hasil percobaan yang telah dilakukan oleh para peneliti menunjukkan bahwa asumsi tersebut cukup layak dan dapat diterima.

1.2 MODEL HUBUNGAN TEGANGAN-REGANGAN MONOTON

Dalam perencanaan terhadap gempa, kita perlu mengevaluasi tegangan baja pada regangan-regangan yang jauh melebihi titik lelehnya, agar lebih akurat dalam menentukan tegangan lentur suatu bagian konstruksi pada kemungkinan deformasi yang besar selama terjadi gempa kuat.

Para peneliti sebelumnya telah menentukan beberapa idealisasi dari hubungan tegangan-regangan monoton. Hasil penelitian yang paling baru adalah yang diusulkan oleh Mander[2], dan juga dipakai dalam studi ini.

Hubungan tegangan-regangan yang dianjurkan tersebut mengandung enam parameter dasar yaitu : f_y , f_{su} , E_{sh} , E_s , ϵ_{sh} , dan ϵ_{su} seperti terlihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Hubungan tegangan-regangan monoton[2].

Kurva hubungan tegangan-regangan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

a) Daerah elastis ($0 \leq \epsilon_s \leq \epsilon_y$)

$$f_s = E_t \epsilon_s \quad (2.1)$$

$$E_t = E_s \quad (2.2)$$

Dimana: $\epsilon_y = f_s/E_s$

E_t adalah tangent modulus

E_s adalah modulus elastisitas

b) Daerah "yield plateau" ($\epsilon_y < \epsilon_s \leq \epsilon_{sh}$)

$$f_s = f_y \quad (2.3)$$

$$E_t = 0 \quad (2.4)$$

c) Daerah "strain hardening" ($\epsilon_{sh} < \epsilon_s \leq \epsilon_{su}$)

Daerah "strain hardening" mulai terjadi pada saat tegangannya melewati tegangan leleh (pada regangan E_{sh}) sampai pada regangan batas (ϵ_{su}).

Regangan batas adalah regangan pada saat

terjadi tegangan batas (f_{su}), bukan regangan pada saat putus yang terjadi pada tegangan yang lebih kecil.

Mander berpendapat bahwa modulus "strain hardening" adalah suatu parameter yang hanya diperlukan untuk menetapkan kurva "strain hardening" disamping koordinat awal (ϵ_{sh} , f_y) dan koordinat akhir (ϵ_{su} , f_{su}).

Cara pendekatan yang dipakai untuk menetapkan kurva "strain hardening" ialah cara yang dianjurkan oleh Burns dan Seiss[2] yang kemudian diperbaharui oleh Kent dan Park[2] yang juga dipakai oleh Mander yaitu : menggunakan suatu persamaan garis antara regangan "strain hardening" dan regangan batas .

Dengan koordinat awal (ϵ_{sh} , f_y) dan koordinat akhir (ϵ_{su} , f_{su}) dari kurva "strain hardening", kita dapat menentukan modulus "strain hardening" (E_{sh}). Persamaan dari kedua titik koordinat tersebut berbentuk suatu "power curve " dengan koordinat tegangan-regangan batas sebagai koordinat awalnya dan dapat ditulis sebagai berikut:

$$\left[\frac{f_{su} - f_s}{f_{su} - f_y} = \frac{\epsilon_{su} - \epsilon_s}{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh}} \right]^p \quad (2.5)$$

Tegangan yang terjadi adalah :

$$f_s = f_{su} + (f_y - f_{su}) \left[\frac{\epsilon_{su} - \epsilon_s}{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh}} \right]^p \quad (2.6)$$

Dimana: p adalah "strain hardening power" dan dapat ditentukan dengan mendiferensial pers (2.6) untuk memberikan "tangent modulus":

$$E_t = \frac{d f_s}{d \epsilon_s} = p \left[\frac{f_{su} - f_y}{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh}} \right] \left[\frac{\epsilon_{su} - \epsilon_s}{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh}} \right]^{p-1} \quad (2.7)$$

Karena modulus "strain hardening" (ϵ_{sh}) terjadi pada saat $\epsilon_s = \epsilon_{sh}$ maka :

$$E_t = E_{sh} = p \left[\frac{f_{su} - f_y}{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh}} \right] \quad (2.8)$$

atau:

$$p = E_{sh} \left[\frac{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh}}{f_{su} - f_y} \right] \quad (2.9)$$

Persamaan (2.9) menyatakan bahwa p adalah perbandingan antara "strain hardening modulus" (E_{sh}) dengan "secant modulus" diantara kedua

titik koordinat tersebut.

Regangan yang terjadi dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\epsilon_s = \epsilon_{su} + (\epsilon_{sh} - \epsilon_{su}) \left[\frac{f_{su} - f_s}{f_{su} - f_y} \right]^{1/p} \quad (2.10)$$

Dari persamaan (2.5), (2.8) dan (2.9) didapat suatu nilai "tangent modulus" elastisitas dari daerah "strain hardening" yaitu :

$$E_t = E_{sh} \left[\frac{f_{su} - f_s}{f_{su} - f_y} \right]^{1-1/p} \quad (2.11)$$

1.3 HUBUNGAN TEGANGAN-REGANGAN PEMBEBANAN BERULANG

Yang dimaksud dengan pembebanan berulang disini adalah beban tarik atau tekan saja yang dikerjakan pada contoh baja tulangan, kemudian beban tersebut dihilangkan kemudian diberikan lagi, demikian seterusnya.

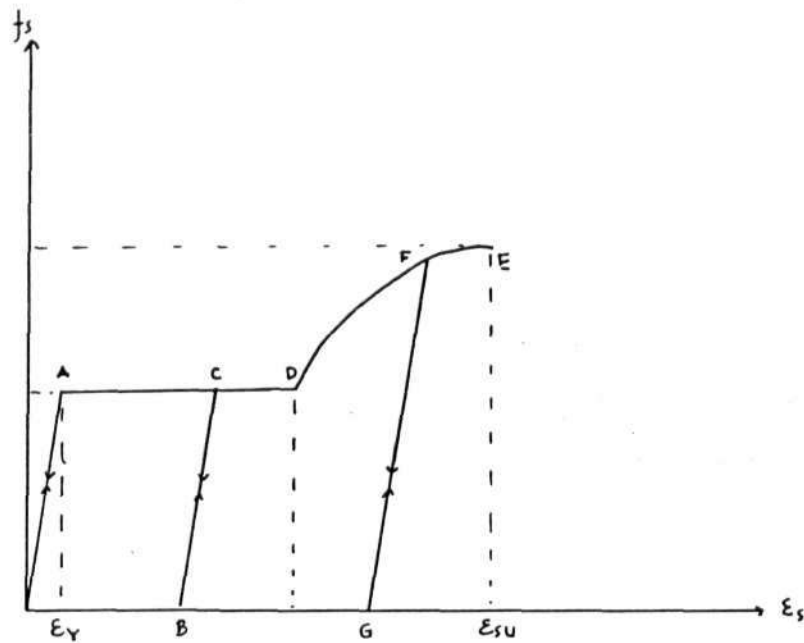
Jika beban pada suatu contoh baja dilepaskan sebelum putus maka kurva akan turun pada panjang bagian regangan dan sejajar dengan garis elastis. Jika dibebani lagi maka kurva akan naik kembali ke kurva asalnya.

Jika beban kecil maka kurva masih dalam daerah elastis dan ditunjukkan oleh garis elastis OA. Jika beban terus diperbesar maka pada suatu saat akan terjadi pelelehan pada baja tulangan, dan pada saat mencapai leleh maka titik tersebut adalah titik leleh (titik A). Hal ini akan menyebabkan baja tulangan mengalami pertambahan panjang tanpa adanya pertambahan tegangan sampai berakhir pada titik D (daerah "yield plateau"). Setelah itu pertambahan beban akan menyebabkan kurva tegangan regangan memasuki daerah "strain hardening" (garis D-E).

Jika sebelum mencapai titik D , misal pada titik C, beban dilepas maka kurva akan turun di titik B dengan membentuk garis yang sejajar dengan garis elastis OA dan jika dibebani lagi dengan beban yang sama maka kurva akan naik kembali ke kurva asal di titik C mengikuti garis BC dengan kemungkinan adanya sedikit penyimpangan sebagai akibat dari " Strain-hardening Effect ". Hal yang sama berlaku pula untuk pelepasan beban dan pembebanan kembali dengan beban yang sama pada daerah "strain hardening" seperti yang ditunjukkan oleh garis FG (FG//OA).

Sesuai dengan keadaan hubungan tegangan-regangan baja tulangan pada gambar 2.3 maka hubungan tegangan-regangan monoton memberikan

suatu idealisasi yang baik sebagai kurva selubung dari hubungan tegangan-regangan pembebanan berulang.



Gambar 2.3 Hubungan tegangan-regangan pembebanan berulang.

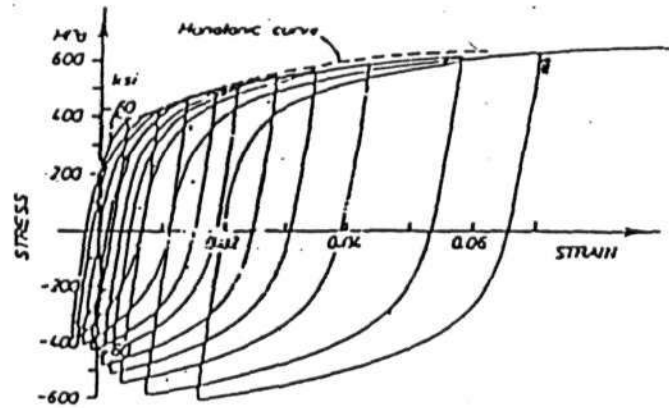
1.4 HUBUNGAN TEGANGAN-REGANGAN PEMBEBANAN BOLAK-BALIK

Jika suatu struktur menerima beban gempa kuat maka struktur tersebut mengalami pembebanan bolak-balik yang dapat menyebabkan tegangannya berada dalam daerah "post-elastis".

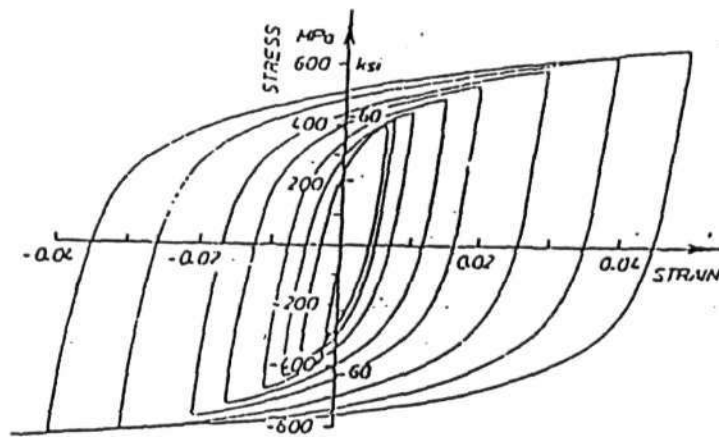
Akibat pembebanan bolak-balik, hubungan tegangan-regangan baja tulangan amat berbeda dibandingkan dengan akibat pembebanan tarik atau tekan saja, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4 .

Jika baja tulangan masih berada dalam keadaan elastis akibat beban tarik, maka pertambahan panjang yang dialami baja tulangan akan sebanding dengan pertambahan bebannya. Jika beban tarik dilepaskan maka kurva akan turun dan sejajar dengan garis elastisnya, kemudian diberikan beban yang berlawanan (tekan) maka kurva tegangan-regangannya yang terjadi tidak lagi linier, tetapi berupa garis lengkung pada tegangan yang jauh lebih kecil dari tegangan leleh. Terjadinya kurva yang demikian ini disebut dengan " Bauschinger effect ". Prilaku kurva yang demikian dipengaruhi oleh " strain history ", waktu pembebanan dan temperatur .

Gambar 2.4

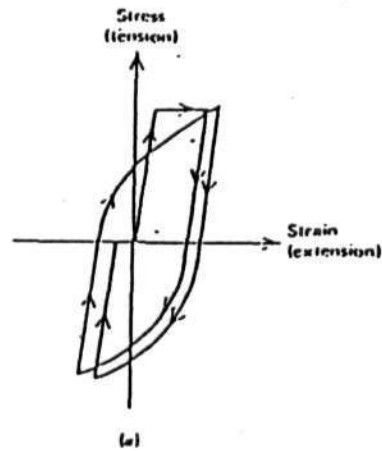


(a) With Unsymmetrical Strain Cycles

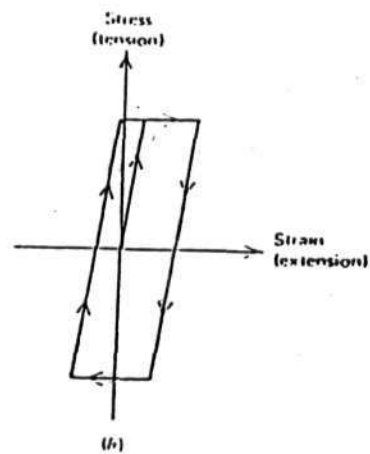


(b) With Symmetrical Strain Cycles

Gambar 2.4. Hubungan tegangan-regangan baja tulangan akibat pembebanan bolak-balik[2]



Gambar 2.5 (a) "Bauschinger effect" dari baja tulangan akibat beban bolak-balik[4]

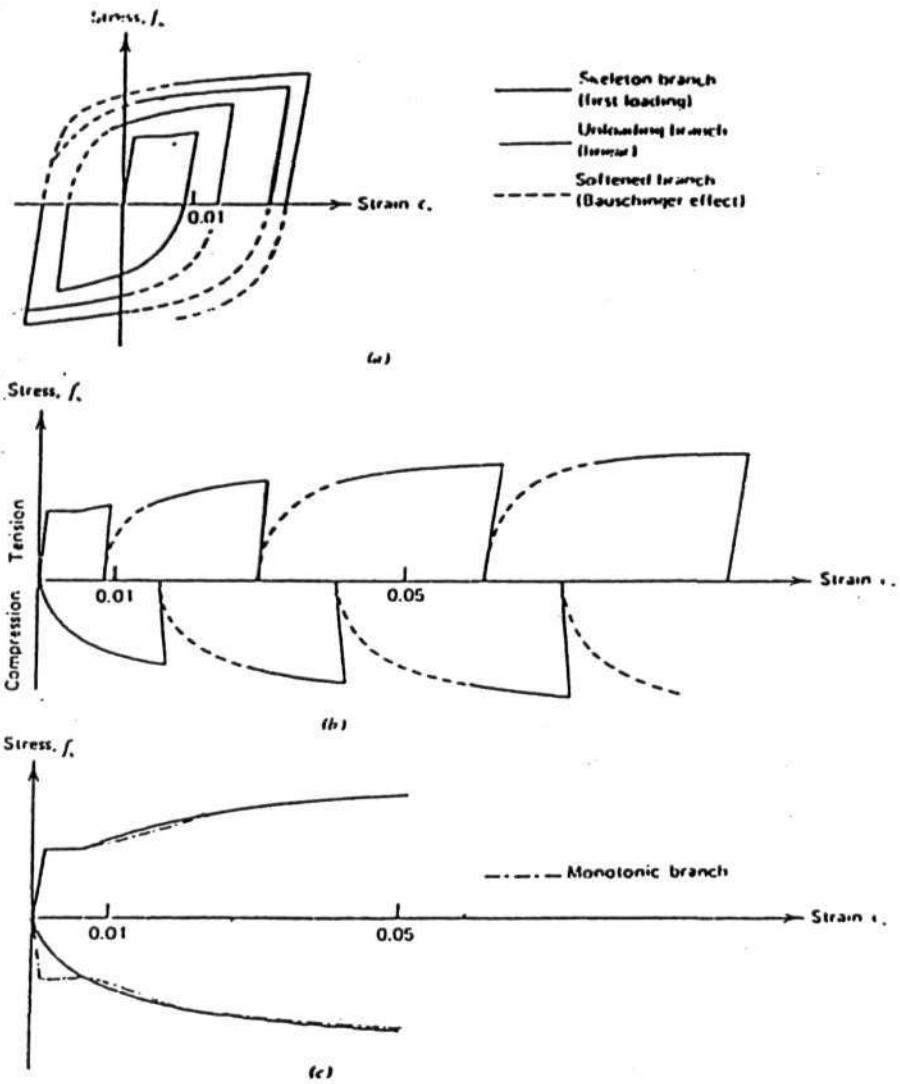


Gambar 2.5 (b) "Elastic-perfectly plastic idealization " untuk baja tulangan akibat beban bolak-balik[4]

Untuk menyederhanakan hubungan tegangan-regangan baja tulangan akibat pembebanan bolak-balik yang cukup rumit, oleh para ahli sering digunakan suatu pendekatan yaitu " Elastic- perfectly plastic idealization " seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5 (a) dan 2.5 (b).

Ada dua jenis hubungan tegangan-regangan baja tulangan akibat pembebanan bolak-balik yang ditinjau dari mayoritas jenis pembebanannya. Yang pertama jika salah satu jenis pembebanannya lebih besar daripada jenis pembebanan yang lain seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4 (a), dimana pembebanan tarik lebih besar dari pembebanan tekan, sehingga sebagian besar kurva hubungan tegangan-regangan baja tulangan berada pada sisi regangan tarik. Yang kedua adalah pembebanan tarik dan tekan sama besarnya sehingga kurva hubungan tegangan-regangan baja tulangan terletak simetri terhadap kedua sisi regangannya, seperti terlihat pada gambar 2.4 (b).

Berdasarkan pada hasil-hasil eksperimen oleh Kato dkk[2] ditunjukkan bahwa hubungan tegangan-regangan monoton akibat tarikan dan tekanan memberikan suatu idealisasi yang baik untuk hubungan tegangan-regangan akibat beban bolak-balik. Untuk jelasnya lihat gambar 2.6 (a), (b) dan (c).

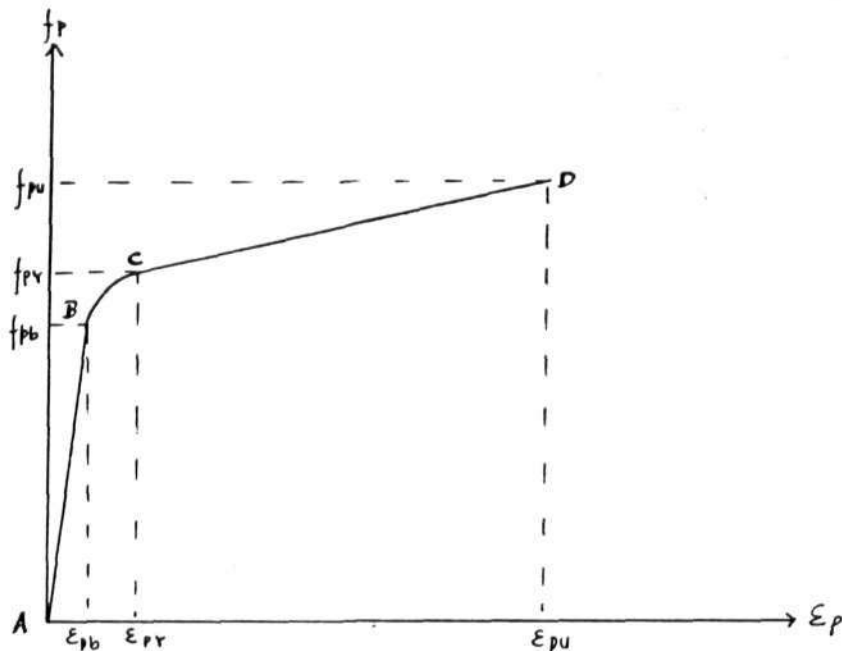


Gambar 2.6 Hubungan tegangan-regangan baja akibat beban bolak-balik[4]

2. BAJA PRATEGANG

Hubungan tegangan-regangan baja prategang yang dipakai dalam studi ini adalah bentuk hubungan tegangan-regangan yang dikembangkan oleh Blakeley dan Park[3] .

Kurva hubungan tegangan-regangan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut (lihat gambar 2.7):



Gambar 2.7 Hubungan tegangan-regangan dari baja prategang.

a) Daerah AB ($\epsilon_p \leq \epsilon_{pb}$)

$$f_{ps} = E_p \epsilon_p \quad (2.12)$$

Dimana: ϵ_p = regangan baja prategang

ϵ_{pb} = regangan baja prategang pada titik B
(batas elastis)

f_{ps} = tegangan baja prategang

E_p = modulus elastisitas baja prategang

b) Daerah BC ($\epsilon_{pb} < \epsilon_p \leq \epsilon_{py}$)

$$f_{ps} = \frac{f_{py} \epsilon_{py} - f_{pb} \epsilon_{pb}}{\epsilon_{py} - \epsilon_{pb}} + \frac{\epsilon_{pb} \epsilon_{py} (f_{pb} - f_{py})}{\epsilon_p (\epsilon_{py} - \epsilon_{pb})} \quad (2.13)$$

Dimana: f_{pb} = tegangan baja prategang pada titik B
(batas elastis)

ϵ_{py} = regangan leleh baja prategang

f_{py} = tegangan leleh baja prategang

c) Daerah CD ($\epsilon_{py} < \epsilon_p \leq \epsilon_{pu}$)

$$f_{ps} = f_{py} + \frac{(\epsilon_p - \epsilon_{py})}{(\epsilon_{pu} - \epsilon_{py})} * (f_{pu} - f_{py}) \quad (2.14)$$

Dimana: ϵ_{pu} = regangan batas baja prategang

f_{pu} = tegangan batas baja prategang

Bentuk hubungan tegangan-regangan ini bersama-sama dengan hubungan tegangan-regangan dari baja tulangan yang telah diuraikan didepan, dipakai dalam analisa "moment-curvature" dari penampang beton untuk mendapatkan nilai faktor "overstrength" lentur.