

Minggu ke 4, Struktur Bangunan Rendah

STRUKTUR BETON
BERTULANG UNTUK
BANGUNAN SEDERHANA

REFERENSI

- RSNi3-2002
- Desain Beton Bertulang (Chu Kia Wang, Charles G Salmon diterjemahkan Binsar Hariandja)
- Struktur Beton Bertulang (Istimawan Dipohusodo)
- *Reinforced Concrete Structures* (R. Park and T. Paulay)
- Desain Struktur Beton Bertulang (Edward G Nawy, diterjemahkan oleh Bambang Suryoatmodjo)
- Desain Struktur Beton Bertulang, Seri 1 – 4 (Gideon Kusuma dan kawan-kawan)

STRUKTUR BETON BERTULANG

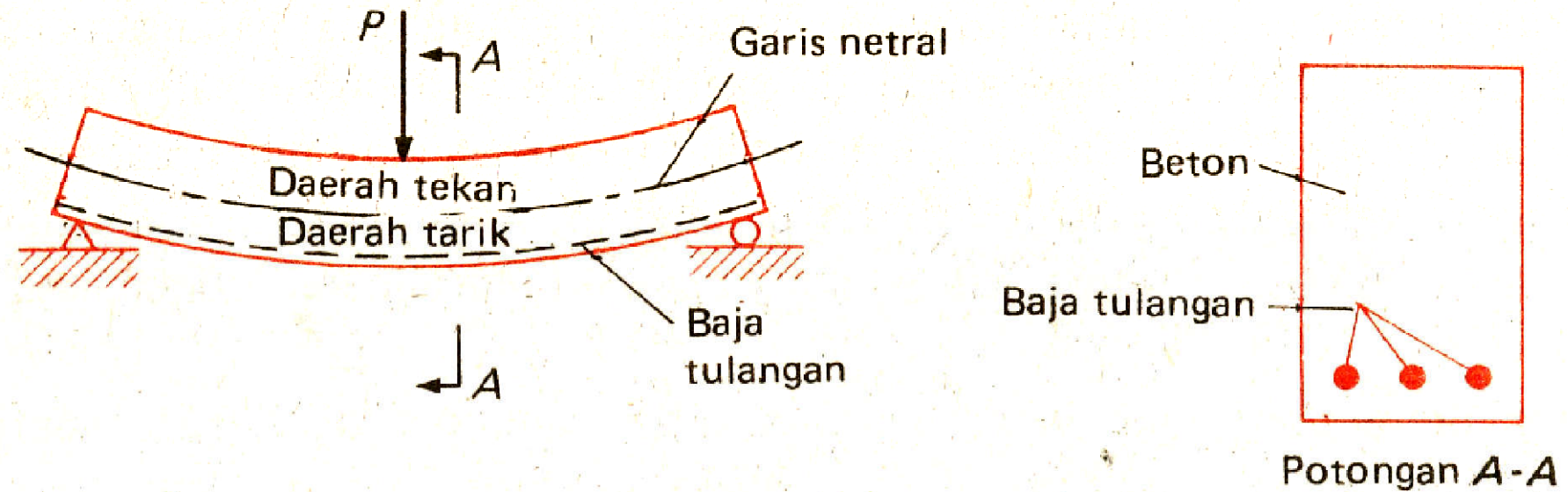
- Tiga jenis bahan yang paling sering digunakan dalam struktur adalah
 - kayu,
 - baja
 - beton bertulang (termasuk beton prategang)
- Beton bertulang adalah unik karena menggunakan dua jenis bahan yaitu beton dan baja tulangan yang digunakan bersamaan, sehingga prinsip-prinsip yang mengatur perencanaan struktur beton bertulang dalam beberapa hal berbeda dengan prinsip-prinsip yang menyangkut satu bahan saja

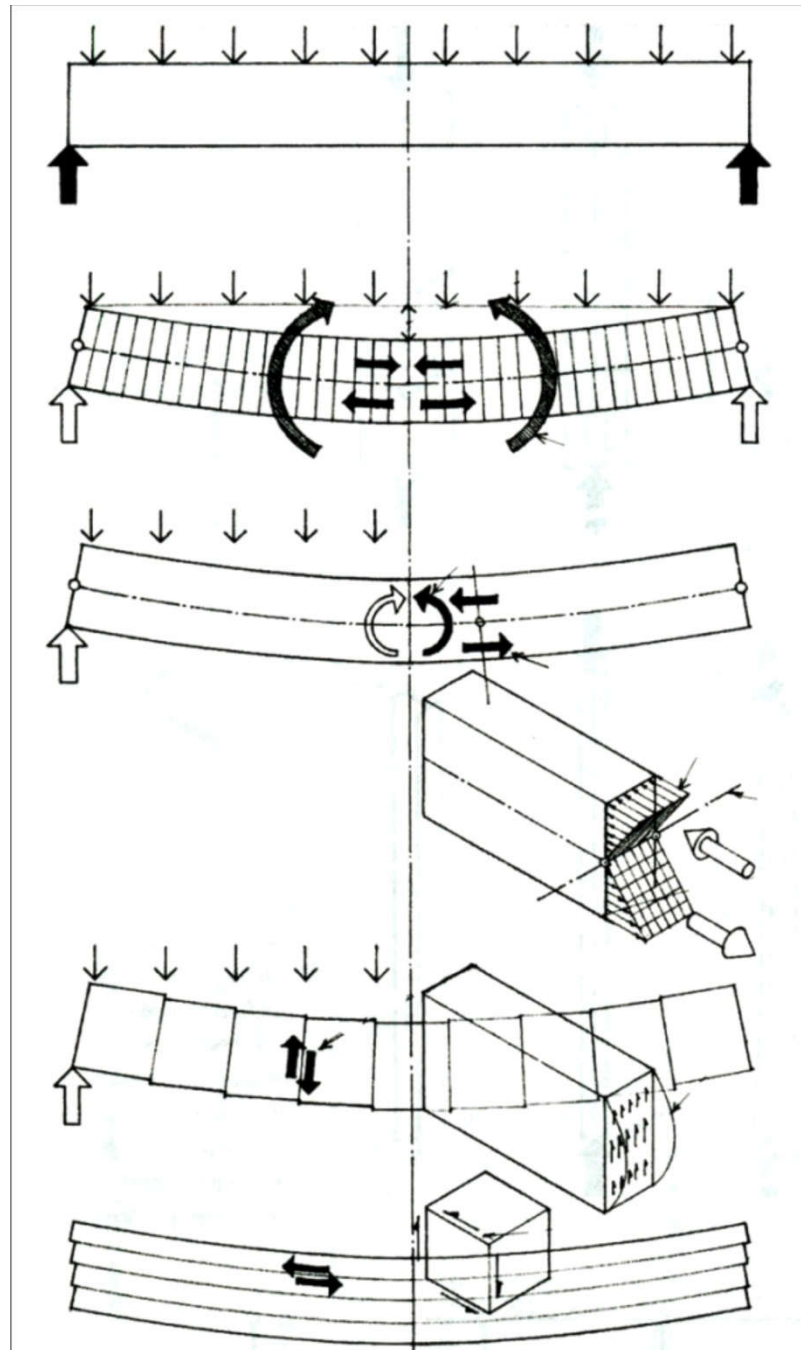
- Banyak struktur dibuat dari beton bertulang adalah jembatan, gedung, dinding penahan tanah, terowongan, tangki dan lain-lain
- Secara umum yang dipelajari dari struktur beton bertulang adalah prinsip-prinsip dasar dalam perencanaan dan pemeriksaan unsur-unsur dari beton bertulang yang dibebani dengan
 - Gaya aksial (axial force)
 - Momen lentur (bending moment)
 - Geser (shear)
 - Puntir (torsion)
 - Gabungan dari gaya-gaya ini

TEKAN, TARIK & RETAK PADA BALOK.

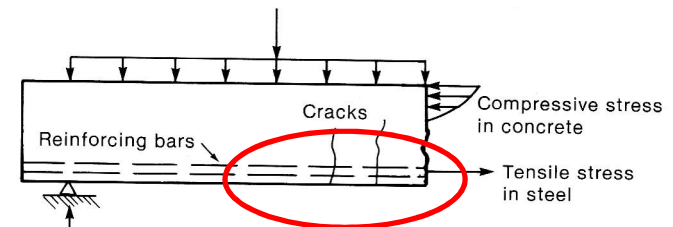
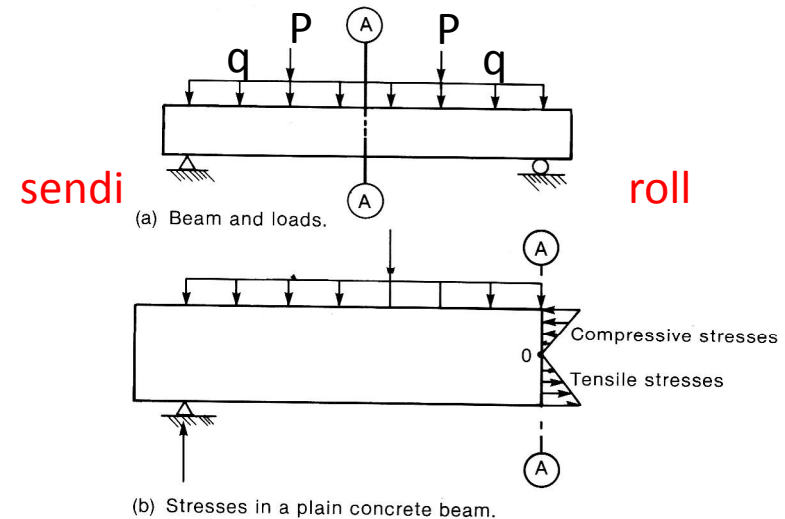
- Jika balok beton (tanpa tulangan) ditumpu oleh tumpuan sederhana (sendi dan rol), dan di atas balok tersebut bekerja beban terpusat P serta beban merata q , maka akan timbul momen luar sehingga balok akan melengkung ke bawah. Pada balok yang melengkung ke bawah akibat beban luar ini pada dasarnya ditahan oleh kopel gaya-gaya dalam yang berupa tegangan **tekan** dan **tarik**.
Jadi pada serat-serat balok bagian **tepi atas** akan menahan **tegangan tekan**, dan semakin ke bawah tegangan tersebut akan semakin kecil.
Sebaliknya, pada serat-serat bagian **tepi bawah** akan menahan **tegangan tarik**, dan semakin ke atas tegangan tariknya akan semakin kecil pula.
- (lihat gambar berikut)

- Gelagar, Lendutan dan penulangannya



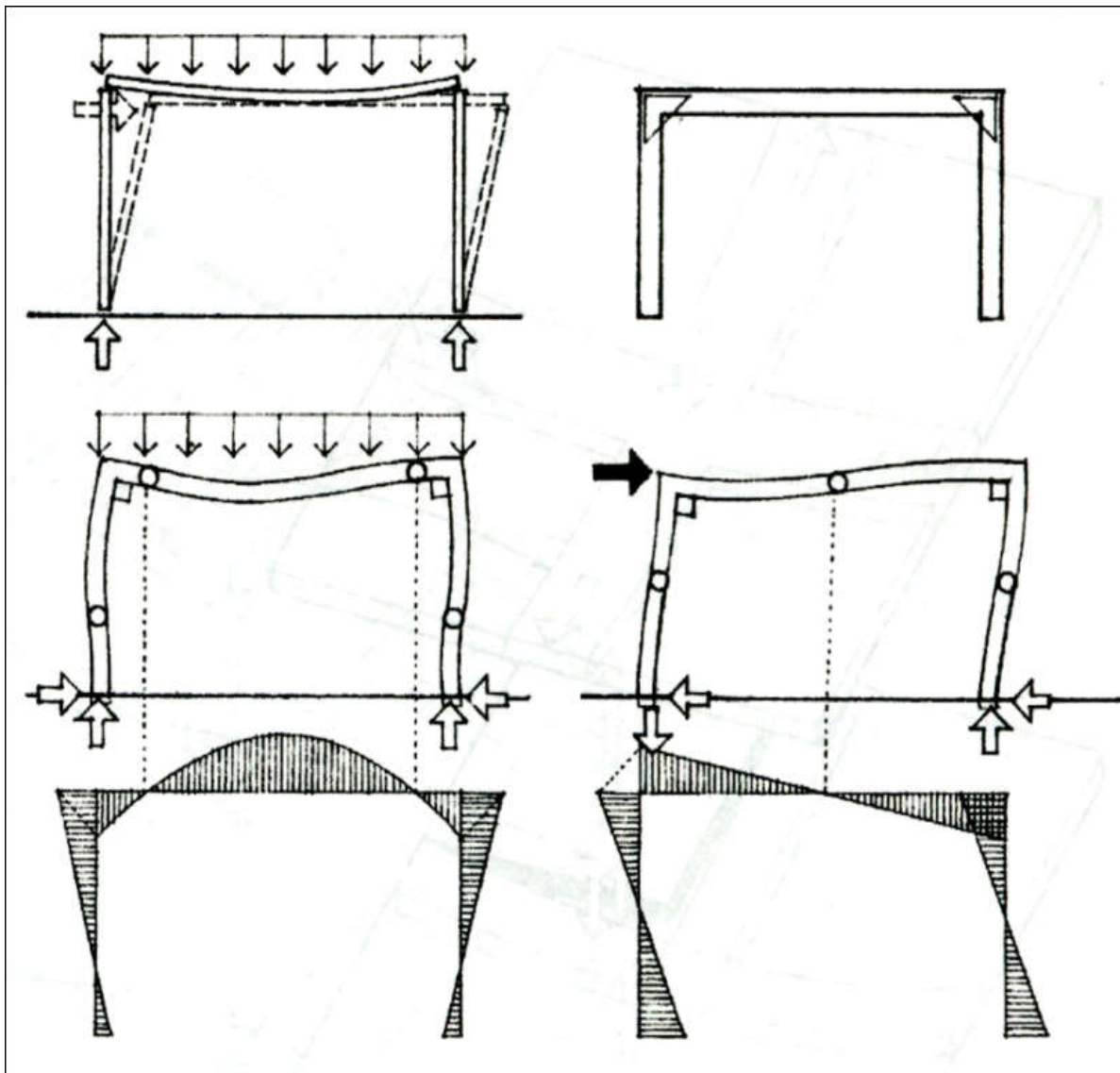


BALOK



- **Retak** terjadi pada beton karena tidak kuat memikul tegangan tarik
- Pada balok beton bertulang ini, tulangan ditanam sedemikian rupa, sehingga gaya tarik yang dibutuhkan untuk menahan momen pada penampang retak dapat ditahan oleh **baja tulangan** (tarik)

PORTAL



- Retak terjadi pada beton karena tidak kuat memikul tegangan tarik
- Defleksi, lendutan dan tekuk menimbulkan tegangan tarik yang membutuhkan **baja tulangan tarik**

BETON DAN SISTEM STRUKTUR

- Pada pelaksanaan struktur dengan bahan beton dikenal 3 (tiga) metode pembangunan yang umum dilakukan, yaitu sistem **konvensional**, **sistem formwork** dan **sistem pracetak**.
- **Sistem konvensional** adalah metode yang menggunakan bahan tradisional kayu dan triplek sebagai formwork dan perancah, serta pengecoran beton di tempat.
- **Sistem formwork** sudah melangkah lebih maju dari sistem konvensional dengan digunakannya sistem formwork dan perancah dari bahan metal. Sistem formwork yang telah masuk di Indonesia, antara lain System Outinord dan Mivan. Sistem Outinord menggunakan bahan baja sedangkan Sistem Mivan menggunakan bahan alumunium.
- **Pada sistem pracetak**, seluruh komponen bangunan dapat difabrikasi lalu dipasang di lapangan. Proses pembuatan komponen dapat dilakukan dengan kontrol kualitas yang baik

- Prinsip-prinsip pokok gaya (*Gaya aksial (axial force)*; *Momen lentur (bending moment)*; *Geser (shear)*; *Puntir (torsion)*; *Gabungan dari gaya-gaya ini*) tersebut pada dasarnya berlaku di dalam struktur apa saja, selama variasi gaya aksial, geser dan momen dan sebagainya dalam satu struktur diketahui
- Dalam struktur beton bertulang, dikenal
 - Analisa (menghitung kapasitas atau kekuatan sebuah struktur yang sudah ada atau sudah jadi)
 - Perencanaan (merencanakan dimensi suatu struktur berdasarkan batasan-batasan yang sudah ditentukan)
- Sekalipun analisa dan perencanaan dapat diperlakukan tersendiri, namun dalam praktek keduanya tidak dapat dipisahkan, terutama pada beton bertulang yang umumnya statis tak tentu

- Beton bertulang terdiri dari :
 - Beton (yang memiliki kekuatan tekan tinggi tetapi memiliki kekuatan tarik yang rendah)
 - Baja tulangan (memiliki kekuatan tarik yang tinggi)
- Baja dan beton dapat bekerja bersama-sama berdasarkan beberapa alasan :
 - Lekatan/*bond* (interaksi antara baja tulangan dengan beton keras di sekelilingnya)
 - Campuran beton yang memadai memberikan sifat anti resap yang cukup dari beton untuk mencegah karat pada baja
 - Angka muai pada baja dan beton yang hampir sama
 - 0,000010-0,000013°C pada beton
 - 0,000012°C pada baja

BETON

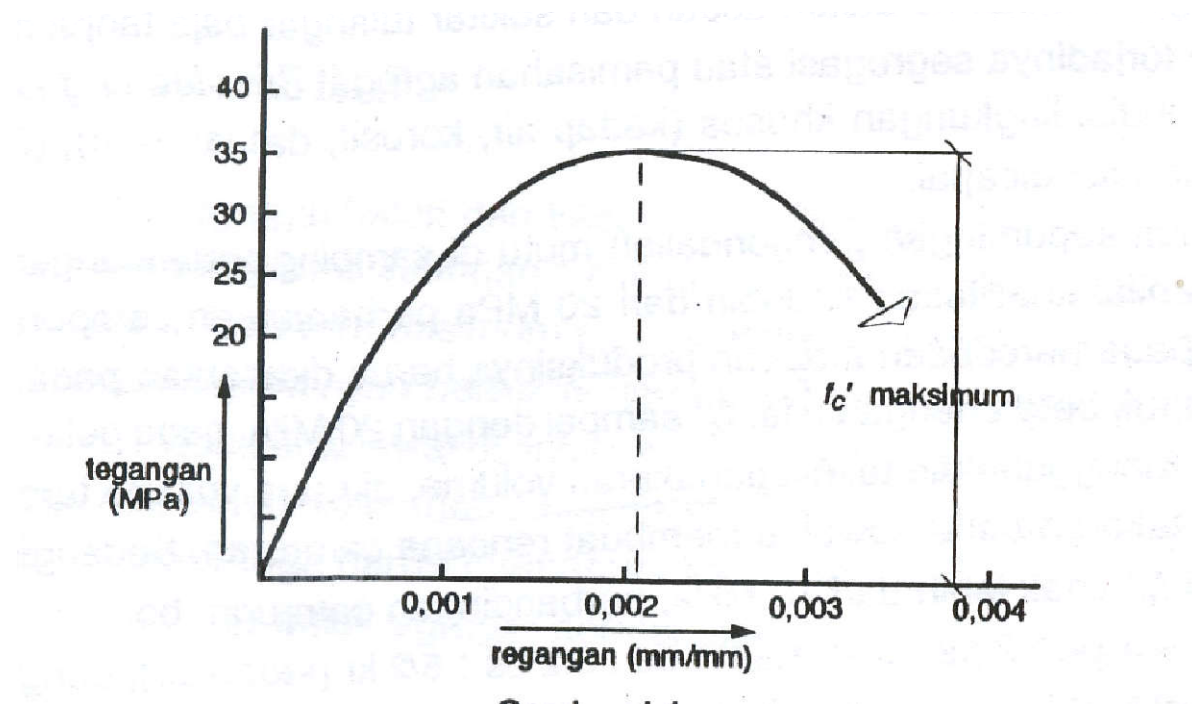
- Unsur-unsur penyusun beton
 - Semen
 - Agregat halus (pasir)
 - Agregat kasar (batu pecah)
 - Air
 - Bahan tambah yang lain
- Kekuatan beton setelah mengeras tergantung dari banyak faktor
 - Proporsi campuran
 - Kondisi temperatur
 - Kelembaban

KUAT TEKAN BETON

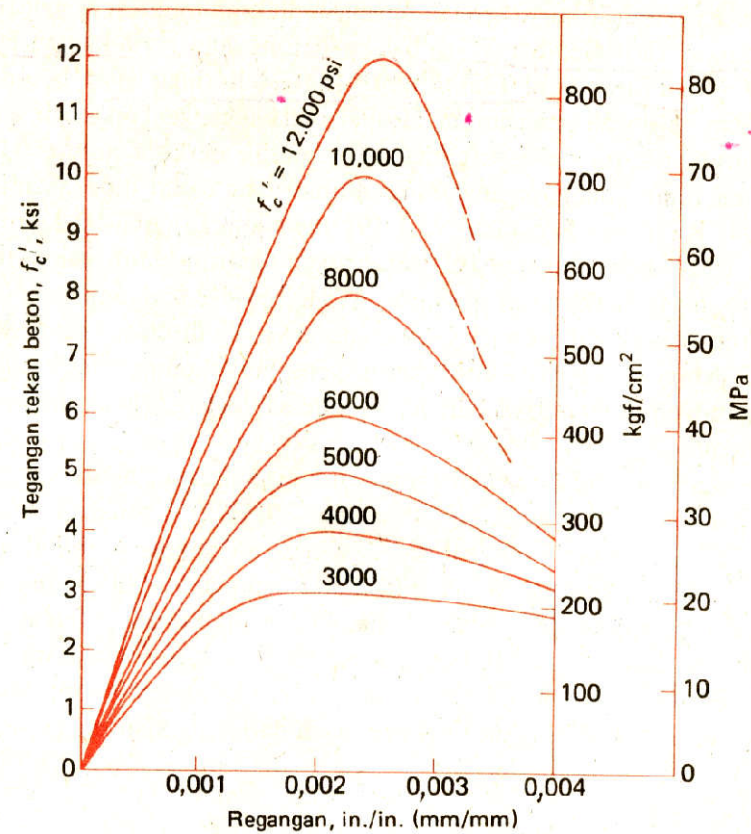
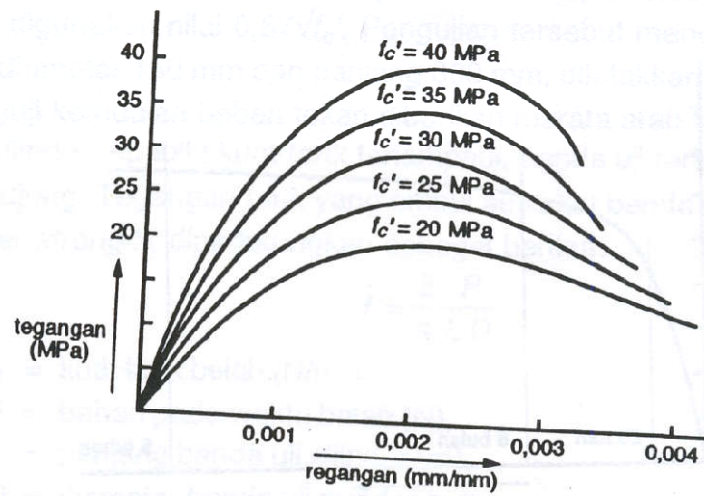
- Kuat tekan beton ditentukan oleh pengaturan perbandingan semen, agregat kasar dan halus, air dan berbagai jenis campuran
- Perbandingan air terhadap semen (f.a.s atau faktor air semen) merupakan faktor utama dalam menentukan kekuatan beton
- Semakin rendah f.a.s semakin tinggi kekuatan tekan, namun kemudahan dalam pengerjaan (workability) menjadi rendah
- Semakin tinggi f.a.s semakin rendah kuat tekan, namun workability menjadi semakin tinggi

- Sejumlah tertentu air diperlukan untuk terjadinya aksi kimia dalam pengerasan beton, dan kelebihan air digunakan untuk kemudahan pekerjaan
- Suatu ukuran pengerjaan campuran beton ini didapatkan dengan pengujian *slump*
- Kuat tekan beton dinyatakan dalam f'_c , yaitu kekuatan beton dalam MPa dari hasil pengujian benda uji berbentuk silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm pada hari ke 28 benda uji dibuat.
- Ada juga benda uji berbentuk kubus dengan ukuran sisi 200 mm

- Kekuatan silinder tidak menunjukkan sifat yang sama persis dengan benda uji berbentuk kubus
- Kekuatan silinder (150x300 mm) adalah 80% kekuatan kubus 150 mm dan 83% kekuatan kubus 200 mm
- Gambar kurva tegangan regangan beton



Kurva hubungan tegangan-regangan pada beton



- Dari gambar kurva tegangan regangan beton tekan terlihat bahwa beton yang berkekuatan lebih rendah mempunyai kemampuan deformasi (daktilitas) yang lebih tinggi dari dari beton berkekuatan tinggi
- Tegangan maksimum dicapai pada regangan tekan di antara 0,002-0,0025
- Regangan ultimit pada saat hancurnya beton berkisar 0,003-0,004 (SNI menetapkan 0,003)
- Dalam perencanaan beton bertulang secara umum ditetapkan kekuatan beton 20-30 MPa untuk struktur tanpa prategang dan 32 sampai 42 MPa untuk beton prategang

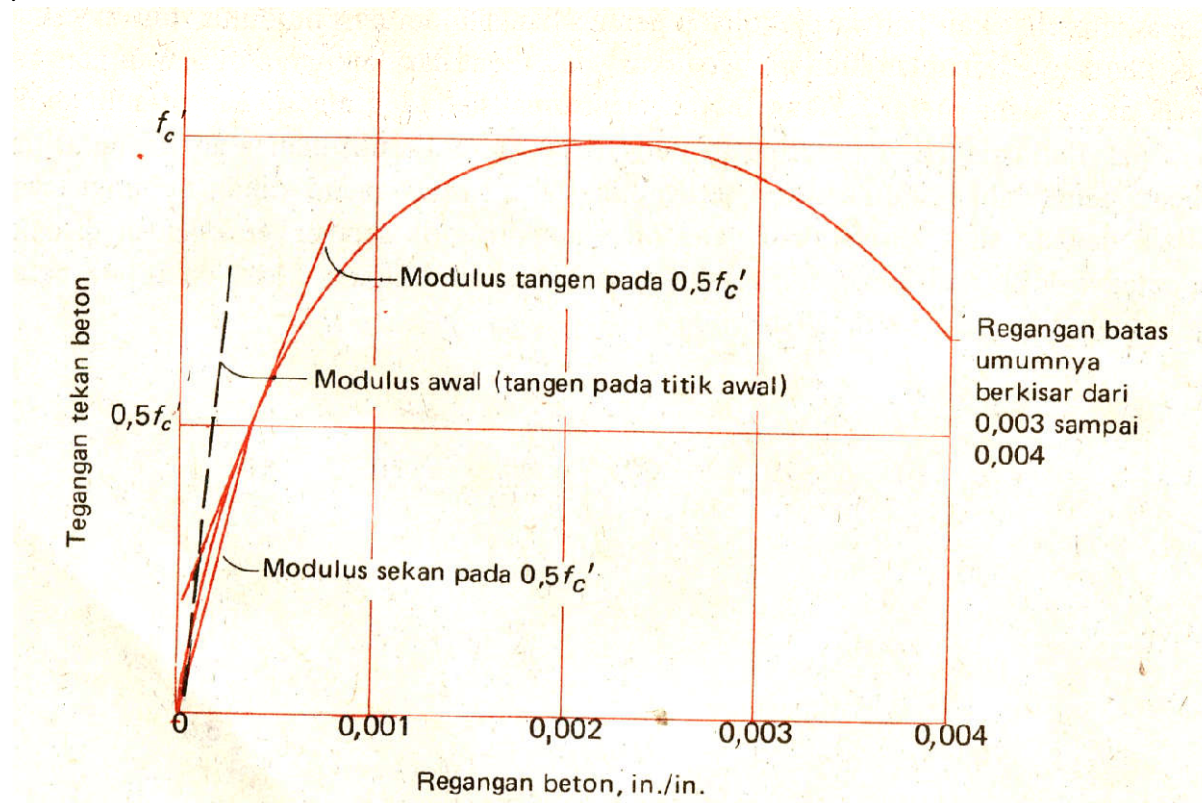
KUAT TARIK BETON

- Kuat tarik beton bisa ditentukan berdasarkan pengujian pembebanan silinder (the split silinder)
- Kuat tarik beton lebih bervariasi dibandingkan kuat tekannya, besarnya berkisar 10-15% kuat tekan beton
- Kuat tarik dalam lentur yang dikenal sebagai modulus runtuh (modulus of rupture) penting dalam menentukan retak dan lendutan balok
- Modulus runtuh f_r , yang didapatkan dari rumus $f = Mc/I$ memberikan nilai kuat tarik yang lebih tinggi daripada harga yang dihasilkan oleh pengujian pembelahan silinder

MODULUS ELASTISITAS

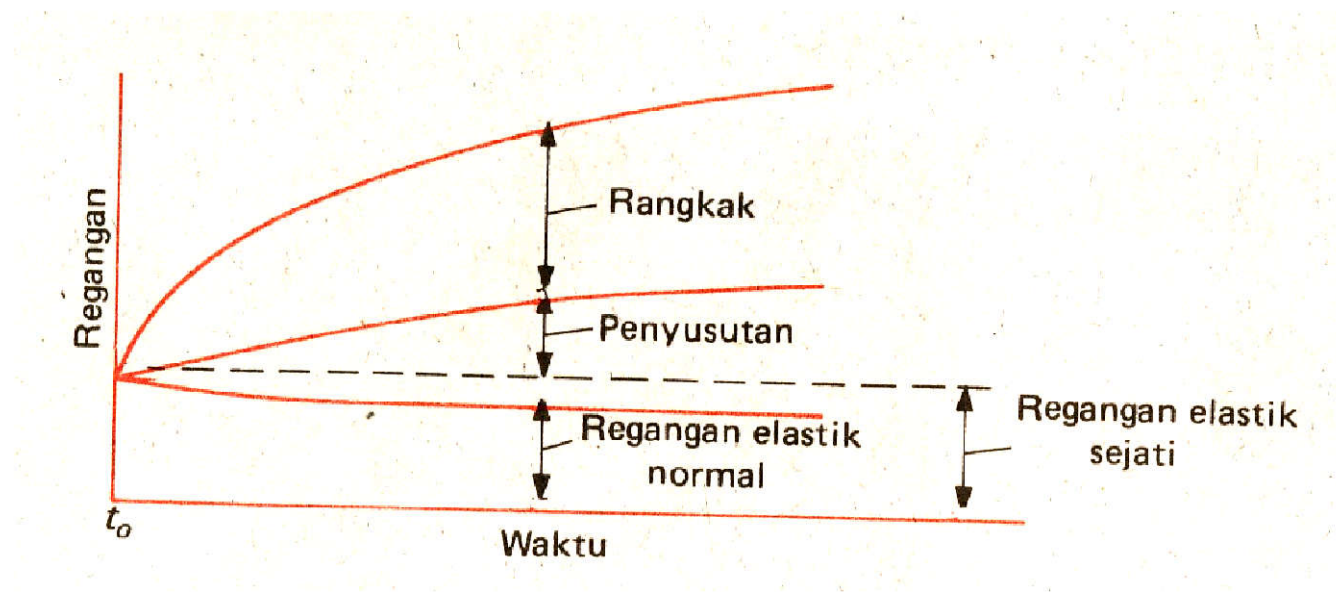
- Modulus elastisitas beton berubah-ubah sesuai kekuatan
- Modulus elastisitas tergantung dari
 - Umur beton
 - Sifat agregat dan semen
 - Kecepatan pembebanan
 - Jenis dan ukuran benda uji
- Karena beton memperlihatkan deformasi yang permanen sekalipun dengan beban kecil, maka ada beberapa definisi untuk modulus elatisitas

- Untuk nilai w_c di antara 1500-2500 kg/m³, nilai modulus elastisitas beton dapat diambil sebesar $(w_c)^{1,5} 0,0043 \sqrt{f'_c}$
- Untuk beton normal E_c dapat diambil sebesar 4700 $\sqrt{f'_c}$ (RSNI 2002 hal 53)



RANGKAK DAN SUSUT

- Rangkak (*creep*) dan susut (*shrinkage*) adalah deformasi struktur yang tergantung dari waktu
- Rangkak adalah salah satu sifat dari beton di mana beton mengalami deformasi menerus menurut waktu di bawah beban yang dipikul pada satu satuan tegangan dalam batas elastis yang diperbolehkan

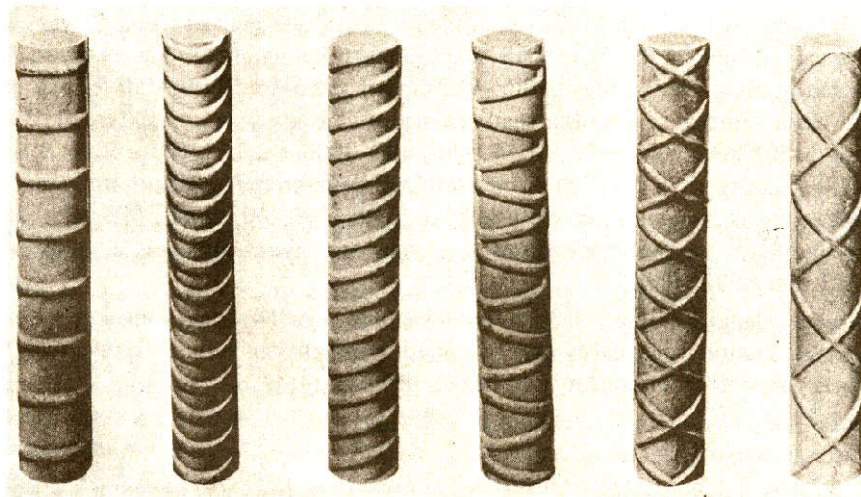


- Faktor-faktor yang mempengaruhi rangkai
 - Konstituen, seperti komposisi dan kehalusan semen, campuran, ukuran, penggolongan mutu dan isi mineral dari agregat
 - Perbandingan air, seperti perbandingan air dengan semen
 - Suhu pada pengerasan dan kebasahan
 - Kelembaban nisbi selama waktu penggunaan beton
 - Umur beton pada pembebanan
 - Lamanya pembebanan
 - Besarnya tegangan
 - Perbandingan antara perbandingan dan isi dari unsur
 - Slump

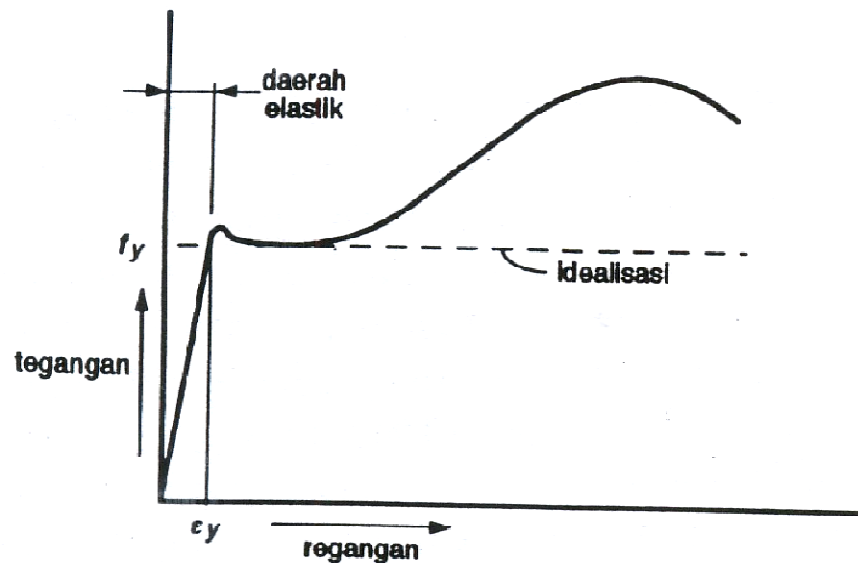
- Susut adalah perubahan volume yang tidak berhubungan dengan pembebanan.
- Ada kemungkinan bagi beton untuk mengeras secara terus menerus di dalam air dengan volume bertambah, namun ada kemungkinan volumenya berkurang
- Umumnya faktor-faktor yang mempengaruhi rangkai juga mempengaruhi susut, khususnya faktor-faktor yang berhubungan dengan hilangnya kelembaban
- Susut yang dihalangi secara simetris oleh penulangan akan menimbulkan deformasi yang umumnya menambah deformasi terhadap rangkai

BAJA TULANGAN

- Baja tulangan dapat terdiri dari
 - Batang tulangan (tulangan polos atau berulir/deform)
 - Anyaman kawat yang dilas
- Tulangan berulir atau deform memiliki bentuk ulir yang bermacam-macam seperti gambar berikut. Adapun fungsi ulir adalah untuk menambah lekatan antara beton dengan baja



- Baja mempunyai kuat karakteristik yang dinamakan dengan tegangan leleh baja f_y
- Gambar tegangan regangan baja

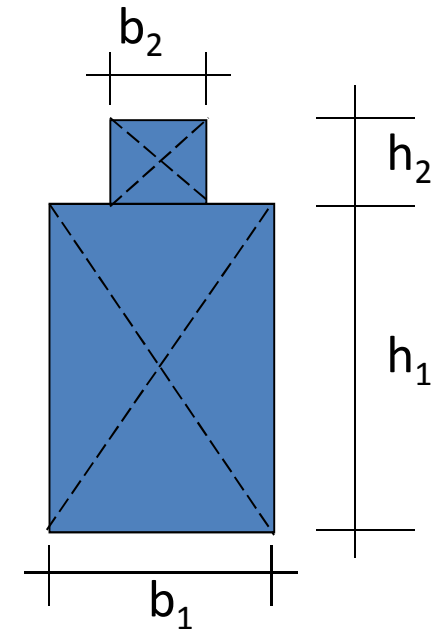
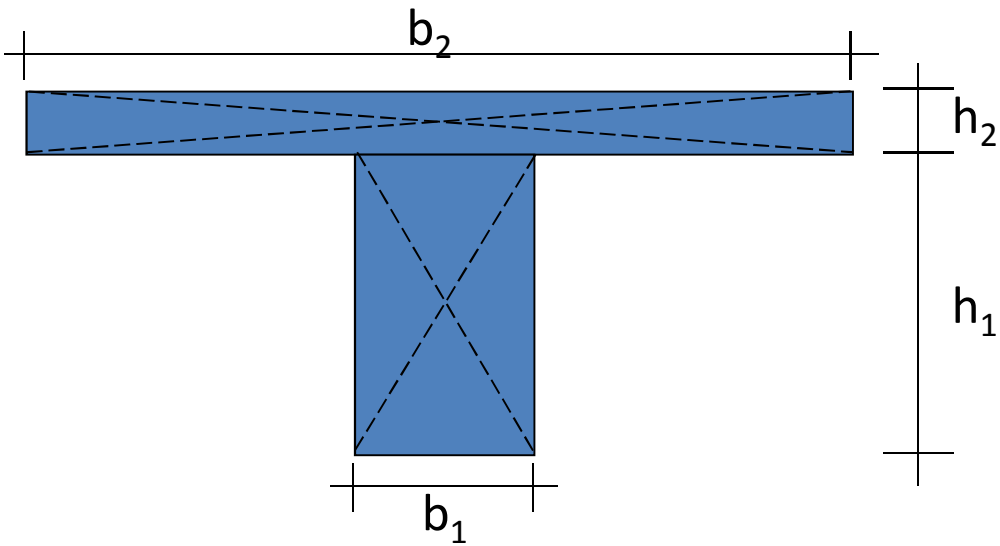


- Kawat anyam yang dilas digunakan untuk slab tipis, shell tipis dan di tempat lain di mana tidak tersedia tempat yang cukup untuk menempatkan tulangan dengan penutup dan jarak bersih yang memenuhi syarat

- Kawat dalam bentuk kawat tunggal atau kumpulan kawat yang membentuk strand digunakan untuk beton prategang
- Modulus elastisitas untuk semua baja yang bukan prategang dapat diambil sebesar 200.000MPa. Untuk baja prategang modulus elastisitas sedikit lebih kecil dan bervariasi yaitu kira-kira sebesar 186 MPa.

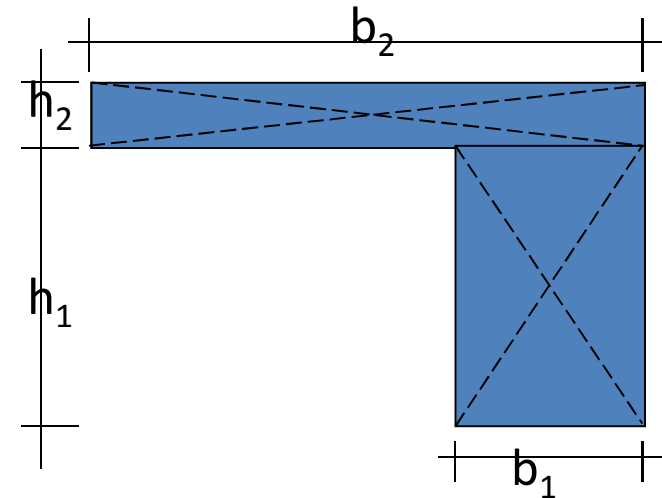
PUSAT BERAT PENAMPANG STRUKTUR

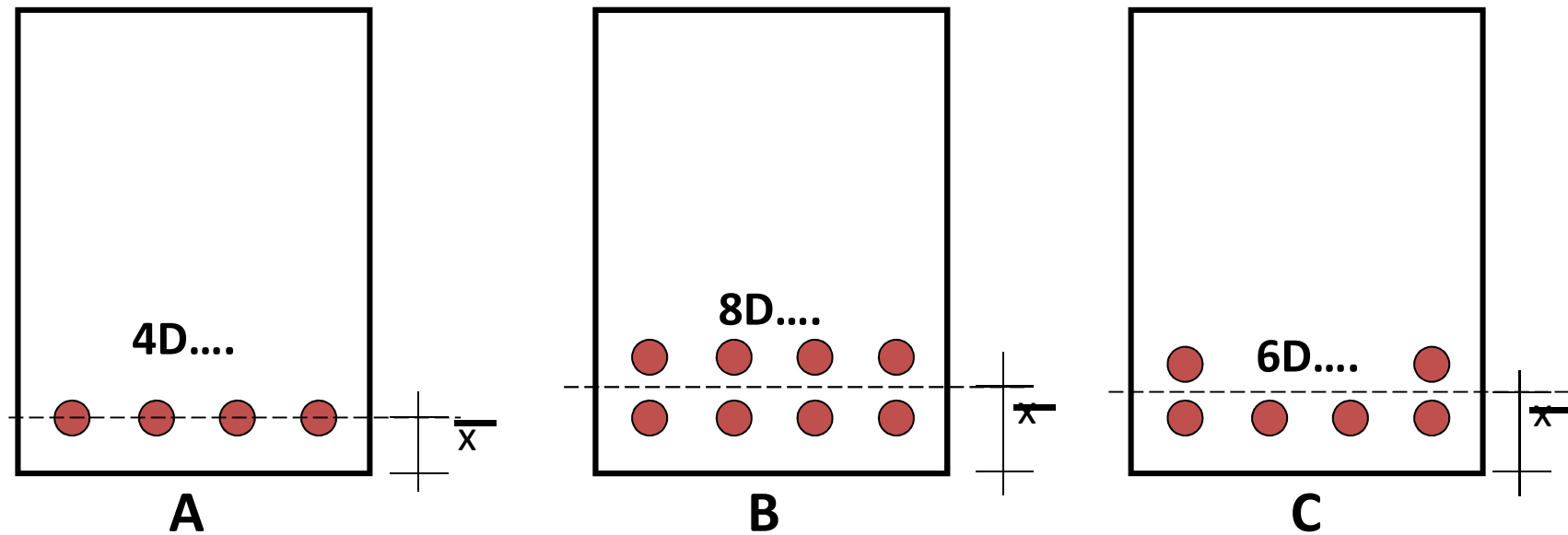
- Dalam menganalisis penampang struktur beton dijumpai satu ketentuan mengenai pusat berat penampang struktur.
- Dalam mata kuliah ini akan disinggung sedikit tentang pusat-berat, yaitu tentang pusat berat penampang struktur dan pusat berat susunan tulangan yang terpasang pada suatu penampang



Pusat berat penampang struktur

$$\bar{x} = \frac{b_1 \cdot h_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot h_1 + b_2 \cdot h_2 \cdot (h_1 + \frac{1}{2} \cdot h_2)}{b_1 \cdot h_1 + b_2 \cdot h_2}$$





- Pusat berat tulangan penampang A

$x = \text{selimut beton} + \emptyset \text{ sengkang} + \frac{1}{2} \cdot \emptyset \text{ tul. utama}$

- Pusat berat tulangan penampang B

$x = \text{selimut beton} + \emptyset \text{ sengkang} + \emptyset \text{ tul. utama} + \frac{1}{2} \cdot 25 \text{ mm}$

- Pusat berat tulangan penampang C

$$X = \frac{4(\text{sel.btn} + \emptyset \text{ sk} + \frac{1}{2} \cdot \emptyset \text{ tul. ut}) + 2(\text{sel.btn} + \emptyset \text{ sk} + \emptyset \text{ tul. ut} + 25 + \frac{1}{2} \cdot \emptyset \text{ tul. ut})}{4+2}$$

(RSNI-2002 ketentuan 9.6 hal 38)

- Jarak vertikal antara tulangan sejajar dalam lapis yang sama, tidak boleh kurang dari d_b ataupun 25 mm (lihat juga ketentuan 5.3.2)
- Bila tulangan sejajar diletakkan dalam dua lapis atau lebih, tulangan pada lapis atas diletakkan tepat di atas tulangan di bawahnya, spasi bersih antar lapisan tidak boleh kurang 25 mm
- Pada komponen struktur tekan yang diperkuat dengan tulangan spiral atau sengkang pengikat, jarak bersih antar tulangan longitudinal tidak boleh kurang dari $1,5d_b$ ataupun 40 mm
- Pada dinding dan plat lantai, selain konstruksi plat rusuk tulangan lentur utama harus berjarak tidak lebih tiga kali tebal dinding atau plat lantai atau 500 mm

BALOK PERSEGI

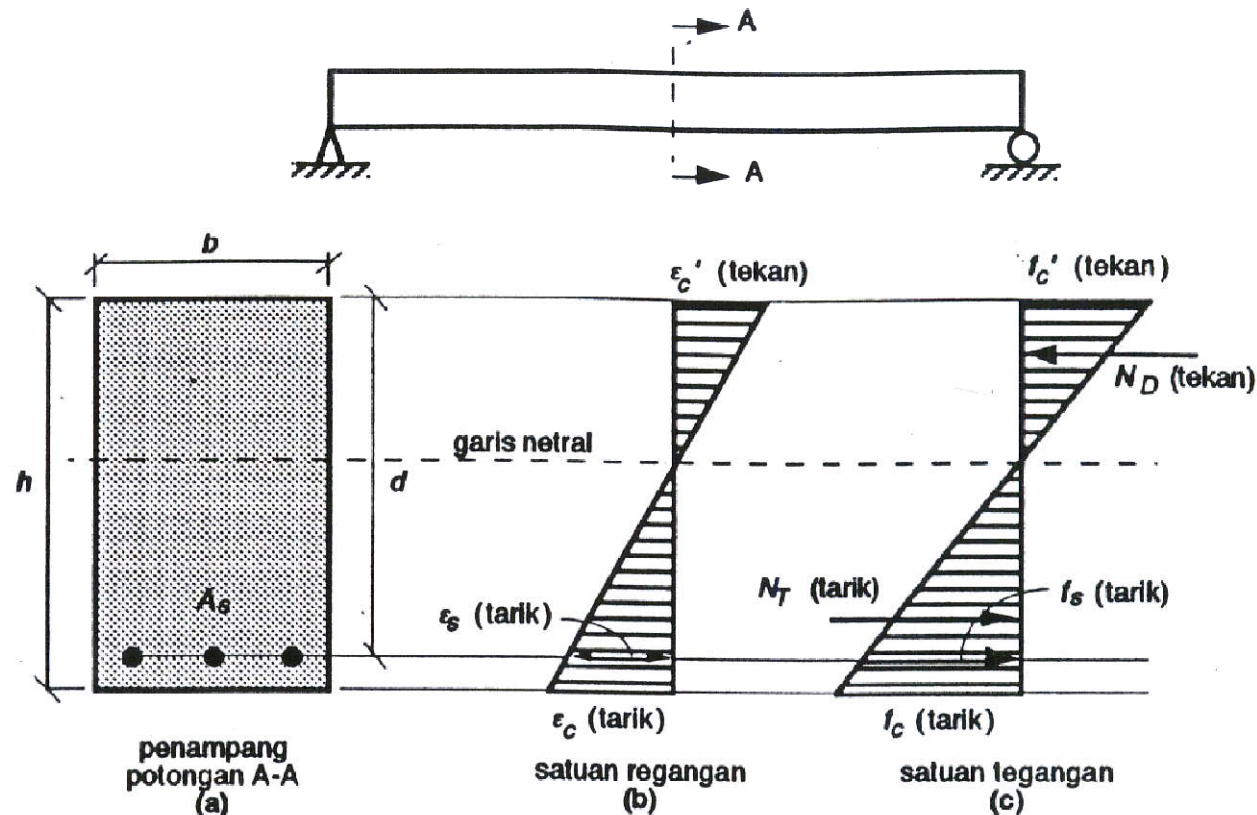
- Apabila suatu gelagar balok menahan beban yang mengakibatkan timbulnya momen lentur, akan terjadi deformasi (regangan) lentur di dalam balok
- Pada momen positif, regangan tekan terjadi di bagian atas dan regangan tarik di bagian bawah penampang.
- Regangan-regangan tersebut akan menimbulkan tegangan-tegangan yang harus ditahan oleh balok, tegangan tekan di bagian atas dan tegangan tarik di bagian bawah
- Balok sebagai sistem yang menahan lentur harus mampu menahan tegangan-tegangan tersebut
- Untuk memperhitungkan kemampuan dan kapasitas dukung komponen struktur beton terlentur, sifat beton yang kurang mampu menahan tarik menjadi dasar pertimbangan, dengan cara memberikan batang tulangan baja di mana tegangan tarik bekerja, sehingga didapatkan struktur yang disebut BETON BERTULANG

METODE ANALISIS DAN PERENCANAAN

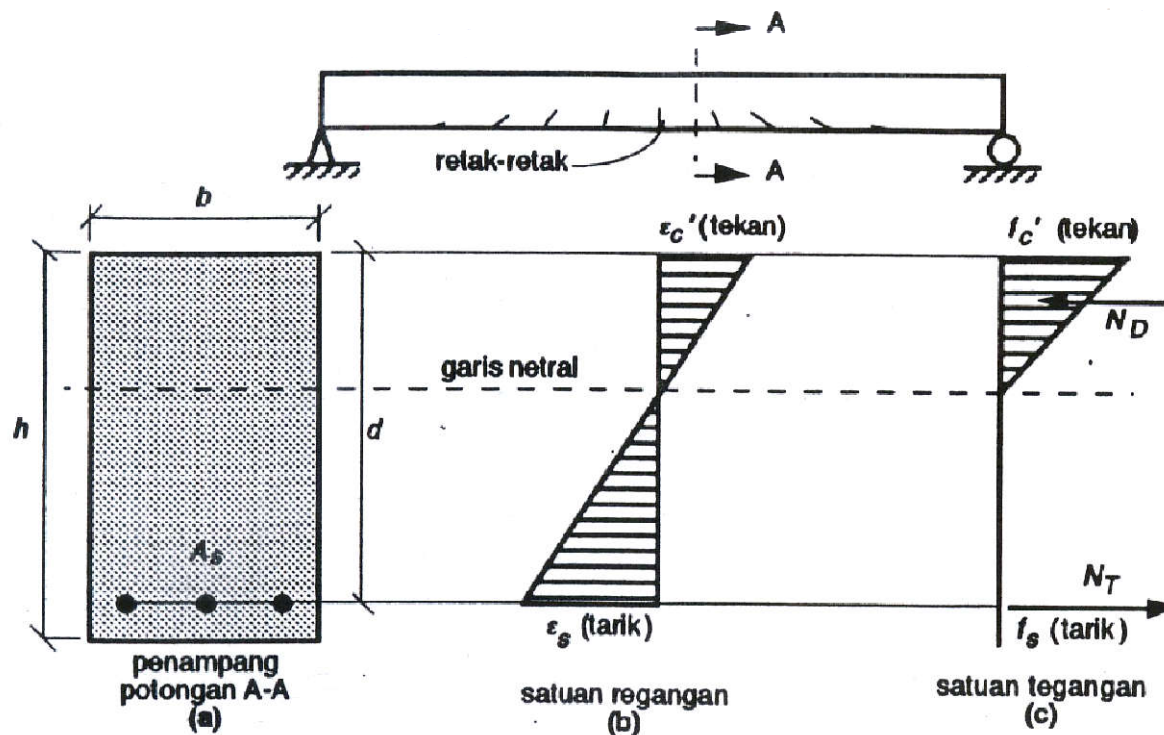
- Metode yang digunakan adalah metode kuat ultimit
- Pada metode ini *service loads* diperbesar, dikalikan dengan suatu faktor beban dengan maksud untuk memperhitungkan terjadinya beban pada saat keruntuhan sudah di ambang pintu.
- Dengan menggunakan beban terfaktor tersebut, struktur direncanakan sedemikian sehingga didapat nilai kuat guna pada saat runtuh besarnya kira-kira sedikit lebih kecil dari kuat batas runtuh sesungguhnya.

- Kekuatan pada saat runtuh tersebut dinamakan kuat ultimit, beban yang bekerja pada atau dekat dengan runtuh dinamakan beban ultimit
- Untuk membahas metode kuat ultimit lebih lanjut diberikan tinjauan tentang perilaku beton bertulang bentang sederhana untuk memikul beban berangsur meningkat mula-mula dari beban kecil sampai pada tingkat pembebanan yang menyebabkan hancurnya struktur

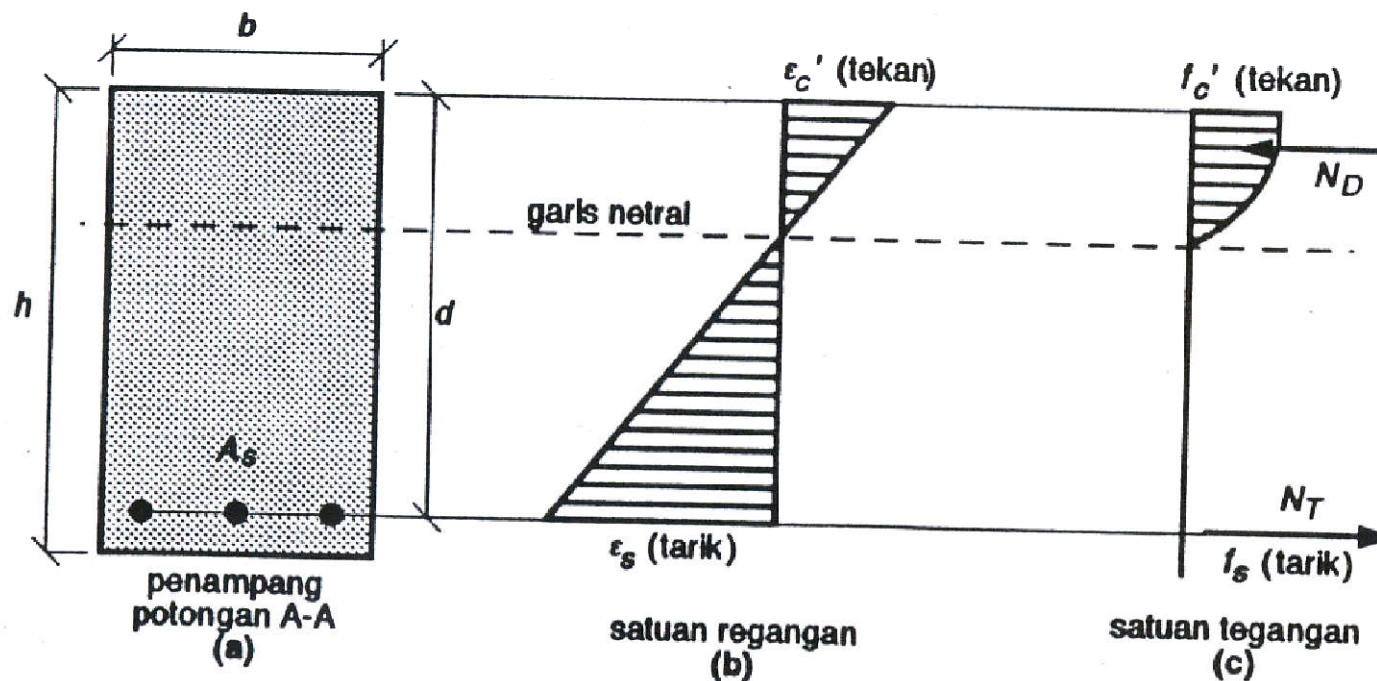
- Pada beban kecil, dengan menganggap bahwa belum terjadi retak beton, beton dan baja bekerja bersama-sama gaya-gaya di mana gaya tekan ditahan oleh beton saja



- Pada beban sedang, kuat tarik beton dilampaui, beton mengalami retak rambut. Karena beton tidak dapat meneruskan gaya tarik melintasi daerah retak karena terputus, baja tulangan mengambil alih memikul seluruh gaya tarik yang timbul
- Keadaan yang demikian diperkirakan akan terjadi pada nilai tegangan beton sampai $\frac{1}{2}f'_c$



- Pada beban yang lebih besar lagi, nilai regangan dan tegangan meningkat dan cenderung tidak lagi sebanding antar keduanya. Tegangan beton membentuk kurva non linier
- Pada gambar berikut terlihat distribusi tegangan regangan yang timbul pada atau dekat pembebanan ultimit. Apabila kapasitas batas kekuatan beton terlampaui dan tulangan baja mencapai luluh, balok akan hancur.

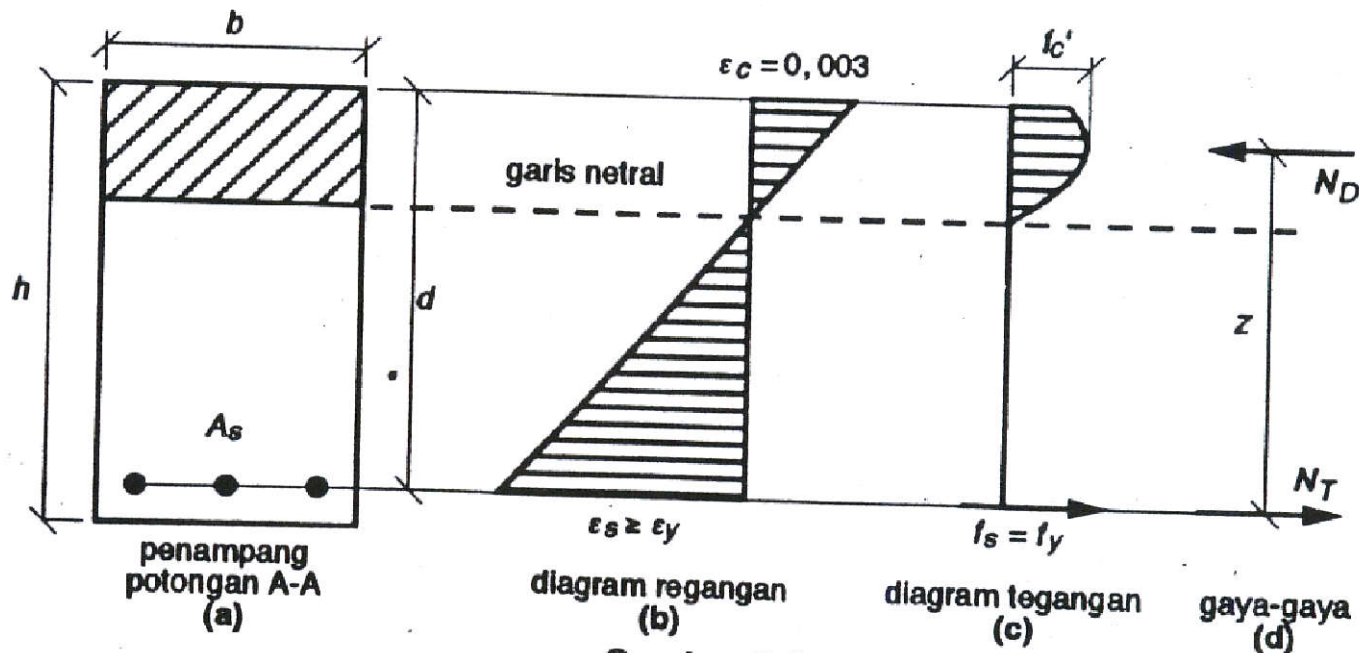


Pendekatan dan pengembangan metode kuat ultimit didasarkan pada anggapan-anggapan

1. Bidang penampang rata sebelum terjadi lenturan, tetap rata setelah terjadi lenturan dan berkedudukan tegak lurus pada sumbu bujur balok. Oleh karena itu nilai regangan dalam komponen struktur terdistribusi linier atau sebanding lurus terhadap jarak ke garis netral.
2. Tegangan sebanding dengan regangan hanya sampai kira-kira beban sedang. Apabila beban meningkat sampai beban ultimit, tegangan yang timbul tidak sebanding lagi dengan regangannya berarti distribusi tegangan tekan tidak lagi linier. Bentuk blok tegangan tekan pada penampangnya berupa garis lengkung dimulai dari garis netral dan berakhir pada serat tepi tekan terluar
3. Dalam memperhitungkan kapasitas momen ultimit komponen struktur, kuat tarik beton tidak diperhitungkan dan seluruh gaya tarik dilimpahkan kepada tulangan baja tarik

KUAT LENTUR BALOK PERSEGI

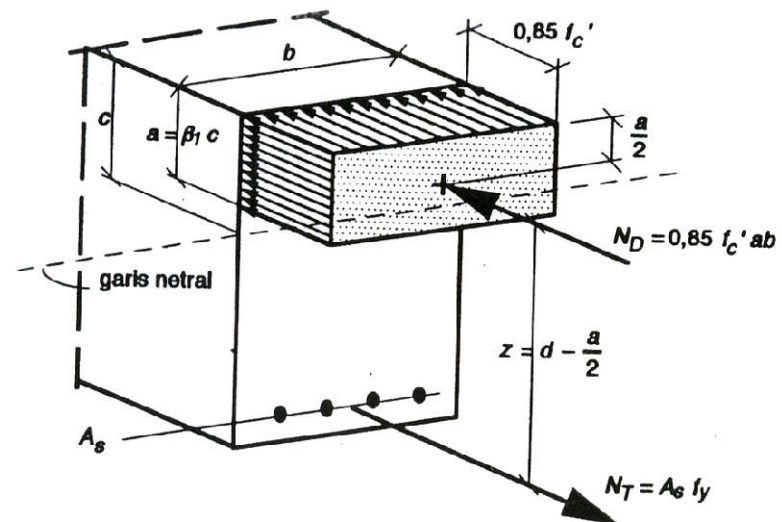
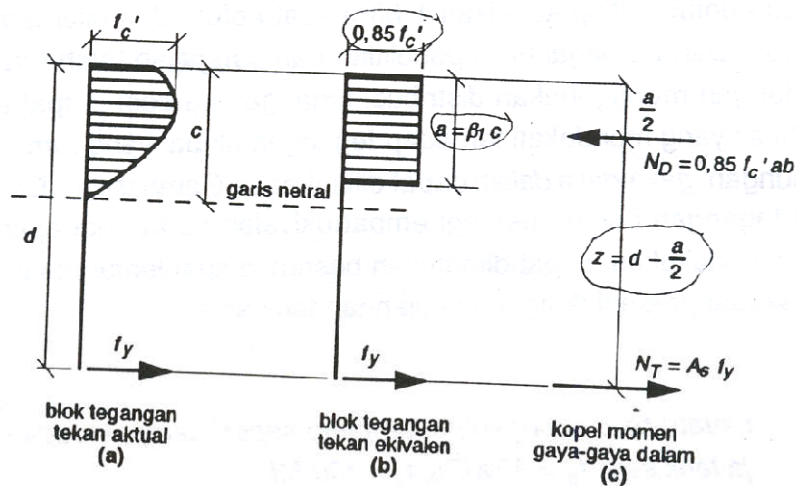
- Pada suatu komposisi balok tertentu balok menahan beban sedemikian hingga regangan tekan lentur beton mencapai maksimum ($\epsilon'_{b \text{ maks}}$) mencapai 0,003 sedangkan tegangan mencapai tegangan tarik baja sudah mencapai tegangan luluh. Apabila hal demikian terjadi, penampang dinamakan mencapai keseimbangan regangan atau disebut penampang bertulangan seimbang
- Gambar



- Kuat lentur suatu balok beton tersedia karena berlangsungnya mekanisme tegangan dalam yang timbul di dalam balok yang dalam kondisi tertentu dapat diwakili oleh gaya-gaya dalam
- N_D atau C_c adalah resultante gaya tekan dalam, merupakan resultante seluruh gaya tekan pada daerah di atas garis netral
- N_T atau T_s adalah resultante gaya tarik dalam, merupakan resultante seluruh gaya tarik pada daerah di bawah garis netral
- Kedua gaya ini, arah garis kerjanya sejajar, sama besar tetapi berlawanan arah dan dipisahkan dengan jarak z sehingga membentuk kopel momen tahanan dalam di mana nilai maksimumnya disebut kuat lentur atau momen tahanan penampang komponen struktur terlentur

- Momen tahanan dalam memikul momen lentur rencana aktual yang ditimbulkan oleh beban luar
- Dalam merencanakan balok pada kondisi pembebanan tertentu harus disusun komposisi dimensi balok beton dan jumlah serta besar tulangan sedemikian rupa sehingga dapat menimbulkan momen tahanan dalam paling tidak sama dengan momen lentur maksimum yang ditimbulkan oleh beban
- Kesulitan timbul pada saat menentukan menghitung besarnya C_c tetapi juga dalam menentukan letak C_c karena bentuk blok tegangan tekan yang berupa garis lengkung

- Untuk tujuan penyederhanaan, Whitney mengusulkan bentuk persegi panjang sebagai distribusi tegangan tekan ekuivalen.



- Berdasarkan bentuk empat persegi panjang, intensitas tegangan beton tekan rata-rata ditentukan sebesar $0,85f'_c$ dan dianggap bekerja pada daerah tekan dari penampang balok selebar b dan sedalam a , dan besarnya ditentukan rumus

$$a = \beta_1 \cdot c$$

dengan c = jarak serat tekan terluar ke garis netral

β_1 = konstanta yg merupakan fungsi kelas kuat beton

- SNI3-2002 ps 12.2 hal 69 menetapkan nilai β_1
 - untuk $f'_c \leq 30$ MPa $\beta_1 = 0,85$
 - untuk $f'_c \geq 30$ MPa $\beta_1 = 0,85 - 0,008(f'_c - 30)$
 $\beta_1 \geq 0,65$

Dengan notasi sebagai berikut

b = lebar balok

d = tinggi dari serat tekan terluar ke pusat tulangan tarik

A_s = luas tulangan tarik

c = tinggi serat tekan terluar ke garis netral

a = tinggi blok tegangan tekan ekivalen

f_s = tegangan tarik baja

f'_c = Kuat tekan beton

ε_c = regangan beton

ε_s = regangan tarik baja

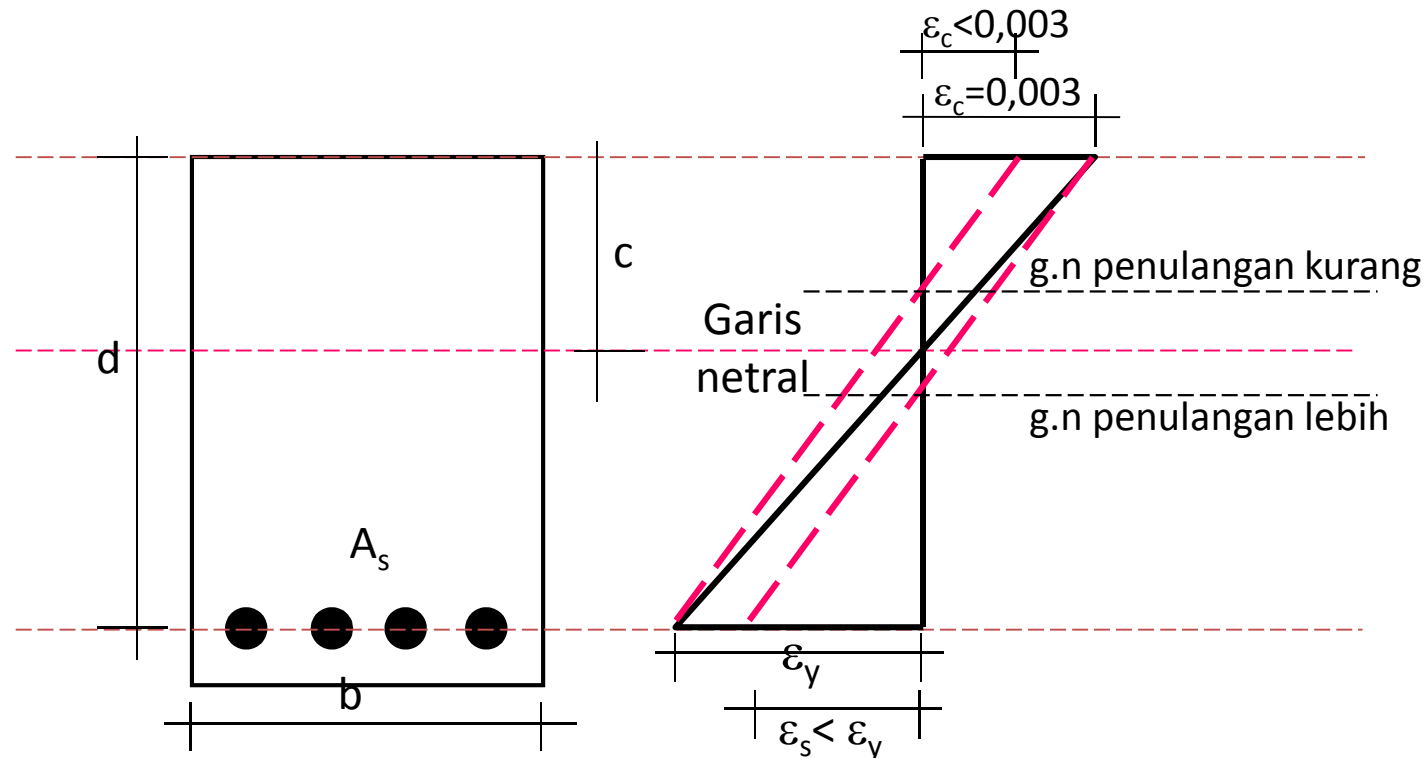
C_c = resultan gaya tekan beton

T_s = resultan gaya tarik baja tulangan

E_s = modulus elastisitas baja = 2.10^5 MPa

PENAMPANG BALOK BERTULANGAN SEIMBANG, KURANG LEBIH

- Suatu penampang dikatakan bertulangan seimbang (*balance*) apabila jumlah tulangan baja tarik sedemikian sehingga letak garis netral pada posisi di mana akan terjadi secara bersamaan regangan luluh pada baja tarik dan regangan tekan beton maksimum 0,003



- Bila penampang balok mengandung jumlah tulangan tarik lebih banyak dari yang diperlukan untuk mencapai keseimbangan regangan, penampang balok dikatakan bertulangan lebih (*overreinforced*).
 - Berlebihnya tulangan mengakibatkan garis netral bergeser ke bawah, beton mencapai regangan maksimum 0,003 sebelum baja tarik mencapai luluh
 - Bila dibebani lebih besar lagi struktur akan mengalami kehancuran tiba-tiba (hancur getas)
- Bila suatu penampang mengandung jumlah tulangan tarik kurang dari yang diperlukan untuk mencapai keseimbangan regangan, penampang disebut bertulangan kurang (*underreinforced*)
 - Letak garis netral naik sedikit dibandingkan kondisi seimbang, baja tarik mencapai regangan luluh sebelum beton mencapai regangan 0,003
 - Bertambahnya beban mengakibatkan tulangan memanjang. Keruntuhan struktur terjadi secara perlahan yang didahului oleh terjadinya lendutan yang meningkat tajam (hancur daktil)

PEMBATASAN TULANGAN

- Untuk mengantisipasi terjadinya keruntuhan struktur secara tiba-tiba maka diusahakan penampang tidak berada dalam keadaan *overreinforced*
- Batas maksimum rasio penulangan
 - $\rho_{\text{maksimum}} = 0,75 \cdot \rho_b$
 - $\rho_b = \{(0,85 \cdot f'_c \cdot \beta_1) / f_y\} \cdot \{600 / (600 + f_y)\}$
- SNI-2002 memberikan batas minimum rasio penulangan
 - $\rho_{\text{minimum}} = 1,4 / f_y$
 - Batas minimum diperlukan untuk menjamin tidak terjadinya hancur secara tiba-tiba seperti yang terjadi pada balok tanpa tulangan
- Rasio penulangan adalah perbandingan antara luas penampang tulangan tarik (A_s) terhadap luas efektif penampang ($b \times d$)
 - $\rho = A_s / (b \times d)$

KEKUATAN DAN KEMAMPUAN LAYAN

- Penerapan faktor aman dalam struktur bangunan bertujuan untuk
 - Mengendalikan keruntuhan yang membahayakan
 - Memperhitungkan faktor ekonomi bangunan
- Struktur bangunan dan komponennya direncanakan untuk memikul beban lebih besar dari beban yang diharapkan bekerja. Kapasitas lebih tsb disediakan untuk memperhitungkan
 - Kemungkinan terjadi beban kerja lebih besar dari yang ditetapkan
 - Kemungkinan terjadi penyimpangan kekuatan komponen struktur akibat bahan dasar atau pengerjaan yang tidak memenuhi syarat

- Kriteria dasar kuat rencana
Kekuatan tersedia \geq kekuatan dibutuhkan
- Kekuatan setiap penampang struktur harus diperhitungkan menggunakan kekuatan dasar tersebut.
- Kekuatan yang dibutuhkan atau disebut kuat perlu menurut RSNI3-2002 dapat diungkapkan sebagai beban rencana ataupun momen, gaya geser dan gaya-gaya lain yang berhubungan dengan beban rencana. Beban rencana atau beban terfaktor didapatkan dari mengalikan beban kerja dengan faktor beban

- Kuat perlu (RSNI3-2002 ps 11.2 hal 58)
 - $U = 1,4D$
 - $U = 1,2D + 1,6L + 0,5(A \text{ atau } R)$
 - $U = 1,2D + 1,0L + 1,6W + 0,5(A \text{ atau } R)$
 - $U = 0,9D + 1,6W$
 - $U = 1,2D + 1,0L \pm 1,0E$
 - $U = 0,9D \pm 1,0E$
 - $U = 0,75(1,2D + 1,2T \pm 1,6L)$
 - $U = 1,2(D + T)$

- Merupakan konsep keamanan lapis kedua dengan menggunakan faktor reduksi kekuatan ϕ dalam menentukan kuat rencananya
- Pemakaian faktor ϕ dimaksudkan untuk memperhitungkan kemungkinan penyimpangan terhadap
 - kekuatan bahan,
 - pengerjaan,
 - ketidaktepatan ukuran,
 - pengendalian dan pengawasan pelaksanaan
- Kuat rencana suatu komponen struktur adalah hasil kali antara kuat nominal dengan faktor reduksi kekuatan ϕ

- Kuat rencana (RSNI3-2002 11.3 hal 60)
 - Lentur tanpa beban aksial 0,80
 - Beban aksial
 - Aksial tarik, dan aksial tarik dengan lentur 0,80
 - Aksial tekan, dan aksial tekan dengan lentur
 - Komp. struktur dng tulangan spiral 0,70
 - Komp. struktur lainnya 0,65
 - Komp. struktur penahan gempa tanpa tul transversal 0,50
 - Geser dan torsi 0,75
 - Geser pd komp str penahan gempa dng kuat geser nominal lbh kecil dari gy geser yg timbul 0,55
 - Geser pada diafragme tdk boleh melebihi faktor reduksi faktor reduksi minimum utk geser yang digunakan pd komp vertikal sistem pemikul beban lateral
 - Geser pada hub balok-kolom, geser pada balok perangkai yang diberi tul diagonal 0,80
 - Tumpuan pada beton 0,65
 - Daerah pengangkuruan pasca tarik 0,85

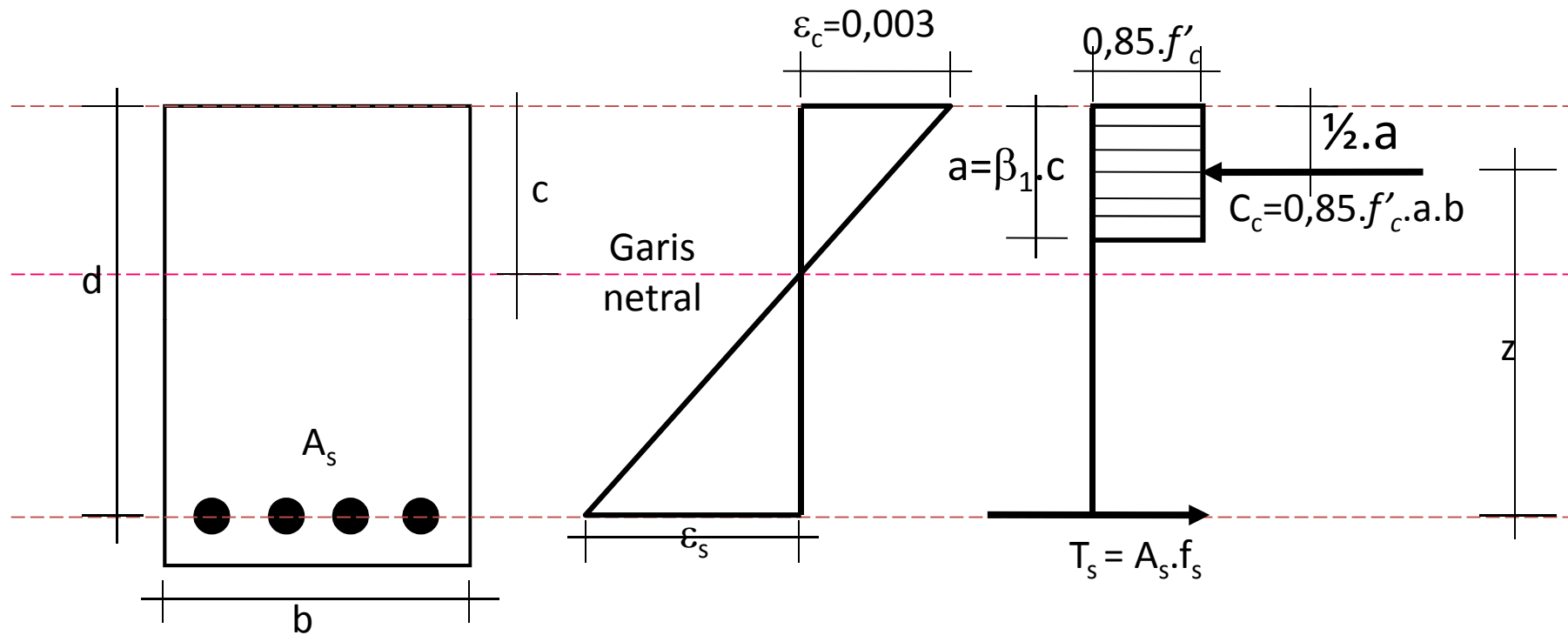
SELIMUT BETON (SNI3-2002 ps 9.7 hal 40)

- Beton yang langsung dicor di atas tanah dan selalu berhubungan dengan tanah 70 mm
- Beton yang berhubungan dengan tanah/cuaca
 - D19 hingga D56 50 mm
 - D16 jaring kawat polos atau kawat ulir
D16 dan yang lebih kecil 40 mm
- Beton tidak langsung berhubungan dengan cuaca/tanah
 - Plat, dinding, plat berusuk
 - D44 dan D56 40 mm
 - D36 dan yg lebih kecil 20 mm
 - Balok, kolom
 - Tulangan utama, pengikat, sengkang, lilitan spiral 40 mm
 - Komponen struktur cangkang, pelat lipat
 - D19 dan yang lebih besar 20 mm
 - D16 jaring kawat polos atau ulir
D16 dan yang lebih kecil 15 mm

BALOK TERLENTUR

- Jenis-jenis balok menurut cara analisa dan desain
 - Balok bertulangan tunggal
 - Balok bertulangan ganda
 - Balok T
 - Jenis-jenis balok lain, misal balok segitiga

BALOK BERTULANGAN TUNGGAL (BERTULANGAN TARIK SAJA)



Analisa balok tulangan tunggal

1. Hitung luas tulangan dalam kondisi seimbang

$$\rho_b = \frac{0,85 \cdot f'_c \cdot \beta_1}{f_y} \frac{600}{600 + f_y}$$
$$A_{sb} = \rho_b \cdot b \cdot d$$

2. Tentukan keadaan tulangan balok yang ditinjau

keadaan *overreinforced* bila $A_s > A_{sb}$

keadaan *underreinforced* bila $A_s \leq A_{sb}$

3. Bila keadaan underreinforced, kapasitas momen balok dihitung

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b}$$

$$M_n = A_s \cdot f_y \cdot (d - \frac{1}{2} \cdot a)$$

atau

$$M_n = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \cdot (d - \frac{1}{2} \cdot a)$$

$$M_R = \phi \cdot M_n$$

Bila keadaan overreinforced, kapasitas momen balok

$$\rho = \frac{A_s}{b.d}$$

$$m = \frac{E_s \cdot \epsilon}{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f'_c}$$

$$k_u = \sqrt{m\rho + \left(\frac{m\rho}{2}\right)^2} - \frac{m\rho}{2}$$

$$c = k_u \cdot d$$

$$a = \beta_1 \cdot c$$

$$M_n = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_R = \phi \cdot M_n$$

Desain balok tulangan tunggal

Ada dua keadaan untuk desain balok, yaitu

1. hanya mencari luas tulangan
2. mencari luas tulangan dan dimensi balok

1. Hanya mencari luas tulangan

Pada cara ini dimensi sudah diketahui dan hanya mencari luas tulangan yang diperlukan untuk menahan momen

a. Hitung koefisien tahanan momen

$$k = \frac{M_u}{\phi \cdot b \cdot d^2}$$

b. Hitung rasio tulangan

$$\rho = \frac{0,85 \cdot f'_c}{f_y} \left(1 - \sqrt{\frac{2k}{0,85 \cdot f'_c}} \right)$$

c. Hitung luas tulangan

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d$$

d. Hitung jumlah tulangan

$$n = \frac{A_s}{A_{tul}}$$

Jumlah ini dibulatkan ke atas kemudian di cek syarat-syarat

2. Mencari luas tulangan dan dimensi balok

a. Tentukan rasio dimensi

$$r = \frac{b}{d}$$

b. Tentukan rasio tulangan perkiraan

$$\rho = 0,5\rho_b = 0,5 \frac{f'_c \cdot \beta_1}{f_y} \frac{600}{600 + f_y}$$

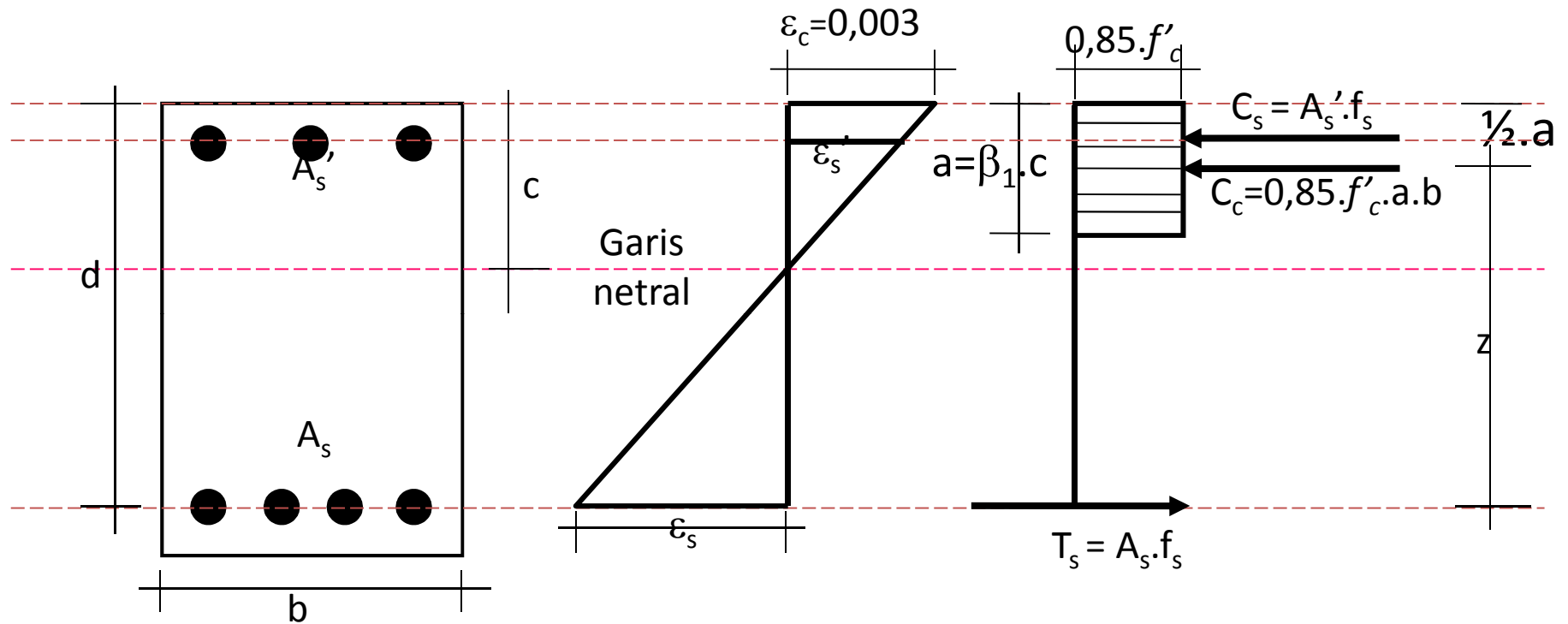
c. Hitung koefisien tahanan momen

$$R_n = \rho \cdot f_y \left(1 - \frac{\rho \cdot f_y}{1,7 \cdot f'_c} \right)$$

d. tentukan tinggi efektif balok

$$d = \sqrt[3]{\frac{M_u}{r \cdot \phi \cdot R_n}}$$

BALOK BERTULANGAN RANGKAP (BERTULANGAN TARIK DAN TEKAN)



Dengan notasi sebagai berikut

b = lebar balok

d = tinggi dari serat tekan terluar ke pusat tulangan tarik

d' = tinggi dari serat tekan terluar ke pusat tulangan tekan

A_s = luas tulangan tarik

A_s' = luas tulangan tekan

c = tinggi serat tekan terluar ke garis netral

a = tinggi blok tegangan tekan ekivalen

f_s = tegangan tarik baja

f_s' = tegangan tekan baja

f_c' = Kuat tekan beton

ε_u = regangan beton

ε_s = regangan tarik baja

ε_s' = regangan tekan baja

C_s = resultan gaya tekan baja tulangan

C_c = resultan gaya tekan beton

T_s = resultan gaya tarik baja tulangan

E_s = modulus elastisitas baja

Masing-masing resultan gaya dalam yang terjadi pada keadaan ultimit adalah sebagai berikut

- a. Gaya tekan pada beton $C_c = 0,85.f'_c.a.b$
- b. Gaya pada tulangan tekan $C_s = A'_s.f'_s$
- c. Gaya tarik pada tulangan tarik $T_s = A_s.f_s$

Pada desain balok maupun kolom maka tegangan baja diidealisasikan dengan diagram bilinier untuk mempermudah perhitungan

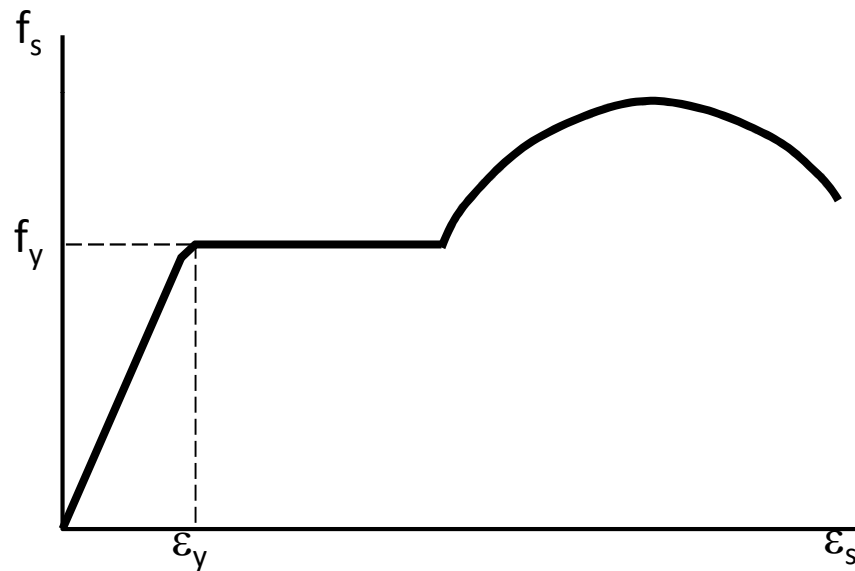


Diagram tegangan regangan aktual

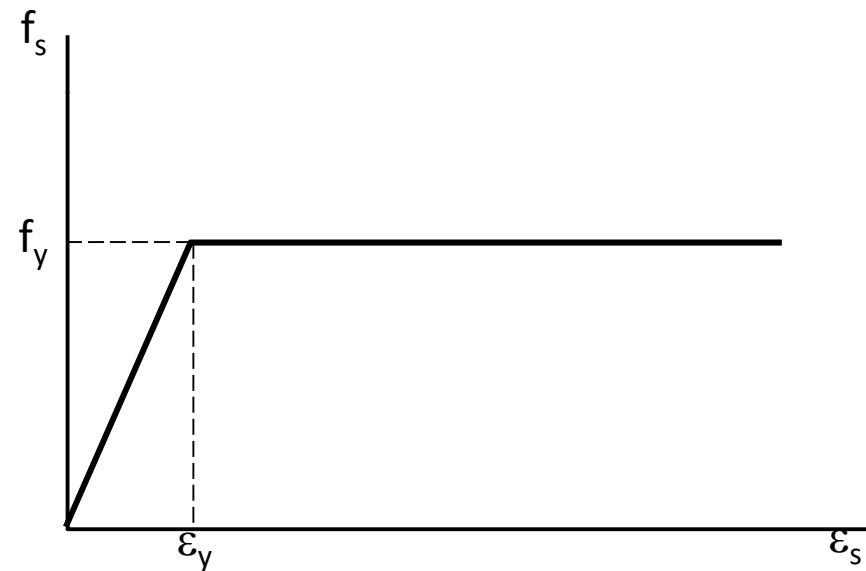


Diagram tegangan regangan yang telah diidealisasi

Dengan adanya idealisasi di atas maka bila regangan baja (baik tulangan tarik maupun tekan) sudah mencapai leleh yaitu $\epsilon_s \geq \epsilon_y$ maka tegangan baja menjadi $f_s = f_y$, sehingga resultan gaya pada tulangan harus diubah menjadi

- a. Gaya tekan pada tulangan tekan bila telah leleh $C_s = A_s' \cdot f_y$
- b. Gaya tarik pada tulangan tarik bila telah leleh $T_s = A_s \cdot f_y$

Dengan adanya kondisi leleh dan tidak leleh dari tulangan tekan maupun tulangan tarik, maka ada 4 kemungkinan terjadinya kondisi ultimit pada balok dengan tulangan ganda, yaitu

1. Tulangan tarik dan tekan sudah leleh
2. Tulangan tarik leleh sedangkan tulangan tekan belum
3. Tulangan tarik maupun tulangan tekan belum leleh
4. Tulangan tarik belum leleh sedangkan tulangan tekan sudah lele

- Keadaan yang paling sering terjadi adalah keadaan 1 dan 2, sedangkan keadaan 3 jarang terjadi dan keadaan 4 hampir tidak pernah terjadi
- Untuk berbagai kondisi dari equilibrium gaya statis maka dapat disusun

$$C_c + C_s = T$$
- Untuk perhitungan analisa balok tulangan ganda harus melalui kondisi 1 dulu, baru setelah diperiksa kelelahan ternyata terjadi kondisi yang lain, maka harus beralih ke kondisi yang baru itu
- Cara pemeriksaan kelelahan dilakukan sebagai berikut

- Untuk regangan tulangan tekan

$$\epsilon_s' = 0,003 \frac{c - d'}{c} = 0,003 \frac{a - \beta_1}{a}$$

- Untuk regangan tulangan tarik

$$\epsilon_s = 0,003 \frac{d - c}{c} = 0,003 \frac{\beta_1 d' - a}{a}$$

- Tegangan pada tulangan dihitung dengan
 - Untuk tegangan tulangan tekan
$$f'_s = \epsilon'_s \cdot E_s \quad \text{bila } \epsilon'_s < \epsilon_y \rightarrow \text{belum leleh}$$
$$f'_s = f_y \quad \text{bila } \epsilon'_s \geq \epsilon_y \rightarrow \text{sudah leleh}$$
 - Untuk tegangan tulangan tarik
$$f_s = \epsilon_s \cdot E_s \quad \text{bila } \epsilon_s < \epsilon_y \rightarrow \text{belum leleh}$$
$$f_s = f_y \quad \text{bila } \epsilon_s \geq \epsilon_y \rightarrow \text{sudah leleh}$$
- Cara perhitungan kapasitas momen/lentur balok dari berbagai kondisi dapat dihitung sebagai berikut.

KONDISI 1

- Tulangan tarik dan tulangan tekan sudah leleh, sehingga persamaan kesetimbangan gaya statis menjadi

$$0,85.f'_c.a.b + A_s'.f_y = A_s.f_y$$

sehingga tinggi blok tekan menjadi

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

setelah dihitung blok tekan maka harus dicek dulu kelelehannya

- Bila sudah leleh semua maka perhitungan dilanjutkan ke perhitungan momen kapasitas balok nominal

$$M_n = 0,85.f'_c.a.b.(d - \frac{1}{2}.a) + A_s'.f_y.(d - d')$$

- Bila salah satu atau keduanya ternyata belum, maka harus perhitungan tinggi blok tekan harus diulangi dengan kondisi yang sesuai

KONDISI 2

- Tulangan tarik sudah leleh sedangkan tulangan tekan belum leleh, sehingga persamaan keseimbangan gaya statis menjadi

$$0,85.f'_c.a.b + A'_s.f'_s = A_s.f_y$$

- Sehingga tinggi blok tegangan tekan dihitung dengan

$$0,85.f'_c.a.b + A'_s.f'_s = A_s.f_y$$

$$0.85.f'_c'.a.b + A'_s'.0,003\frac{a-\beta_1.d'}{a}.E_s = A_s.f_y$$

- Karena $E_s = 2.10^5$ MPa, maka

$$0.85.f'_c'.a.b + A'_s'.600.\frac{a-\beta_1.d'}{a} = A_s.f_y$$

- Kedua suku dikalikan dengan a , maka

$$0.85.f'_c'.a^2.b + A'_s'.600.(a-\beta_1.d') = A_s.f_y.a$$

- Disusun persamaan kuadrat dalam a menjadi

$$0.85.f'_c'.b.a^2 + (A'_s'.600 - A_s.f_y).a - \beta_1.d' = 0$$

- Maka nilai a dapat dihitung dengan rumus ABC dengan memakai rumus plusnya saja

$$a = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

- Dengan

$$A = 0,85.f'_c.b$$

$$B = A_s'.600 - A_s.f_y$$

$$C = -A_s'.600.\beta_1.d'$$

- Bila asumsi kondisi 2 benar maka bisa dilanjutkan dengan perhitungan berikut ini

$$M_n = 0,85.f'_c.a.b(d - \frac{1}{2}.a) + A_s'.f_s'.(d - d')$$

- Bila asumsi salah harus dilakukan asumsi ulang untuk kondisi yang sesuai. Tetapi keadaan salah asumsi yang kedua jarang sekali terjadi, jadi biasanya maksimal kesalahan asumsi hanya terjadi satu kali

KONDISI 3

- Tulangan tarik belum leleh dan tulangan tekan juga belum leleh, sehingga persamaan keseimbangan gaya statis menjadi

$$0,85.f'_c.a.b + A_s'.f_s' = A_s.f_s$$

- Sehingga tinggi blok tegangan tekan dihitung dengan

$$0,85.f'_c.a.b + A_s'.f_s' = A_s.f_s$$

$$0.85.f'_c'.a.b + A_s'.0,003\frac{a - \beta_1.d'}{a}.E_s = A_s.0,003\frac{\beta_1.d - a}{a}.E_s$$

- Karena $E_s = 2.10^5$ MPa, maka

$$0.85.f'_c'.a.b + A_s'.600\frac{a - \beta_1.d'}{a} = A_s.600.\frac{\beta_1.d - a}{a}$$

- Kedua suku dikalikan dengan a , maka

$$0.85.f'_c'.a^2.b + A_s'.600.(a - \beta_1.d') = A_s.600.(\beta_1.d - a)$$

- Disusun persamaan kuadrat dalam a menjadi

$$0.85.f'_c'.b.a^2 + (A_s'.600 - A_s.600).a - A_s'.600.\beta_1.d' - A_s.600.\beta_1.d = 0$$

- Maka nilai a dapat dihitung dengan rumus ABC dengan memakai rumus plusnya saja

$$a = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

- Dengan

$$A = 0,85.f'_c.b$$

$$B = A_s'.600 - A_s.600$$

$$C = -600.\beta_1.(A_s'd' + A_s.d)$$

- Bila asumsi kondisi 3 benar maka bisa dilanjutkan dengan perhitungan berikut ini

$$M_n = 0,85.f'_c.a.b(d - \frac{1}{2}.a) + A_s'.f_s'.(d - d')$$

- Bila asumsi salah harus dilakukan asumsi ulang untuk kondisi 4 yang merupakan kondisi terakhir (untuk masuk ke kondisi 4 ini adalah hal yang jarang terjadi)

KONDISI 4

- Tulangan tarik belum leleh sedangkan tulangan tekan sudah leleh, sehingga persamaan keseimbangan gaya statis menjadi

$$0,85.f'_c.a.b + A_s'.f_y = A_s.f_s$$

- Sehingga tinggi blok tegangan tekan dihitung dengan

$$0,85.f'_c.a.b + A_s'.f_y = A_s.f_s$$

$$0.85.f'_c'.a.b + A_s'.f_y = A_s.0,003 \frac{\beta_1.d - a}{a}.E_s$$

- Karena $E_s = 2.10^5$ MPa, maka

$$0.85.f'_c'.a.b + A_s'.f_y = A_s.600. \frac{\beta_1.d - a}{a}$$

- Kedua suku dikalikan dengan a , maka

$$0.85.f'_c'.a^2.b + A_s'.f_y.a = A_s.600.(\beta_1.d - a)$$

- Disusun persamaan kuadrat dalam a menjadi

$$0.85.f'_c'.b.a^2 + (A_s'.f_y + A_s.600).a - A_s.600.\beta_1.d = 0$$

- Maka nilai a dapat dihitung dengan rumus ABC dengan memakai rumus plusnya saja

$$a = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

- Dengan

$$A = 0,85.f'_c.b$$

$$B = A_s'.f_y + A_s.600$$

$$C = -600.\beta_1.(A_s'd' + A_s.d)$$

- Bila asumsi kondisi 4 benar maka bisa dilanjutkan dengan perhitungan berikut ini

$$M_n = 0,85.f'_c.a.b(d - \frac{1}{2}.a) + A_s'.f_y.(d - d')$$

- Bila asumsi salah maka kemungkinan besar ada kesalahan perhitungan pada kondisi-kondisi yang ditinjau

- Bila sudah didapat momen kapasitas sesuai dengan kondisi yang ada, maka dapat dihitung momen tahanan atau momen resistan

$$M_R = \phi \cdot M_n$$

- Dengan ϕ untuk lentur balok sebesar 0,80, maka

$$M_R = 0,8 \cdot M_n$$

Ada banyak sekali metode untuk perhitungan desain balok tulangan ganda. Berikut ini beberapa cara yang dapat dipergunakan

CARA 1

Selisih tulangan tarik dan tekan disamakan dengan $0,5\rho_b$ dari balok tulangan tunggal

Prosedur yang dipakai adalah sebagai berikut

- Hitung selisih rasio tulangan tarik dan tekan dengan menyamakan $0,5\rho_b$

$$\rho - \rho' = 0,5 \cdot \left(\frac{0,85 \cdot f'_c \cdot \beta_1}{f_y} \cdot \frac{600}{600 + f_y} \right)$$
$$A_s - A_s' = (\rho - \rho') \cdot b \cdot d$$

- Hitung tinggi blok tekan beton dengan menganggap tulangan tekan sudah leleh

$$a = \frac{A_s - A_s'}{0,85 \cdot f'_c \cdot b}$$

- Hitung luas tulangan tekan

$$M_u = 0,8 \cdot \left[(A_s - A_s') \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' \cdot f_y \cdot (d - d') \right]$$

dari langkah di atas hanya A_s' (luas tulangan tekan) yang tida. diketahui, jadi bisa dicari

Setelah A_s' maka A_s bisa dihitung dengan hasil yang diperoleh pada langkah pertama

- Periksa kelelahan tulangan tekan

$$c = \frac{a}{\beta_1}$$

$$\varepsilon_s' = 0,003 \cdot \left(\frac{c - d'}{c} \right)$$

$$f_s = \varepsilon_s \cdot E_s$$

bila $f_s > f_y$ maka perhitungan dapat dilakukan pada langkah selanjutnya

- Menghitung jumlah tulangan berdasarkan luas yang didapat
- Menghitung kapasitas momen

Bila dalam langkah keempat ternyata tulangan tekan belum leleh, maka tulangan masih dapat dipakai dengansyarat kapasitas momen harus lebih besar dari momen beban terfaktor

CARA 3

Pada peraturan disebutkan bahwa jumlah tulangan tekan paling tidak setengah dari jumlah tulangan tarik. Prosedur yang dipakai sedemikian sehingga menjadi setengah dari jumlah tulangan tarik adalah dengan formula yang dihitung dengan menggunakan rumus ABC untuk menghitung rasio tulangan dengan parameter sebagai berikut

$$\rho = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

$$A = \frac{bd^2 \cdot f_y^2}{4 \cdot 0,85 \cdot f_c}$$

$$B = bd \cdot f_y \cdot (d' - 2d)$$

$$C = \frac{M_u}{0,4}$$

Rumus di atas dengan asumsi semua tulangan dalam keadaan leleh, sehingga harus diperiksa daktilitas balok

CARA 2

Minimum compression steel adalah cara perhitungan yang menghasilkan tulangan tekan

- Menyamakan syarat maksimum tulangan tarik dengan rasio tulangan tarik

$$\rho = 0,75 \cdot \left(\frac{0,85 \cdot f'_c \cdot \beta_1}{f_y} \cdot \frac{600}{600 + f_y} + \rho' \right)$$

- Kalikan dengan bd
 $A_s = I \cdot bd + 0,75 \cdot A_s'$

- Substitusikan ke formula berikut

$$a = \frac{(A_s - A_s') \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} = \frac{(I \cdot bd + 0,75 A_s' - A_s') \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b}$$

- Substitusikan a ke dalam formula

$$M_u = 0,8 \cdot \left[(A_s - A_s') \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' \cdot f_y \cdot (d - d') \right]$$

- Semua variabel di atas sudah diketahui kecuali A_s' sehingga A_s' bisa dihitung