BAB II

KOLOM BETON BERTULANG

2.1 Pendahuluan

Sebagai elemen struktur yang berfungsi sebagai pemikul beban tekan, baik sentris maupun tidak sentris, kolom beton bertulang dapat direncanakan berdasarkan sifat-sifat yang dimiliki bahan baja dan beton. Bab ini diawali dengan bahasan tentang asumsi-asumsi yang digunakan pada bahan baja dan beton, serta hubungan tegangan-regangan baja dan beton yang dipakai dalam persamaan kompatibilitas untuk melakukan perhitungan kapasitas kolom.

Suatu kolom dapat dikategorikan sebagai kolom tidak langsing atau kolom langsing. Kekuatan kolom tidak langsing ditentukan oleh kekuatan dari bahan-bahan yang membentuknya, sedangkan kolom tidak langsing ditentukan oleh tekuk yang dialaminya. Semakin tinggi kelangsingannya maka kekuatan yang ada semakin berkurang.

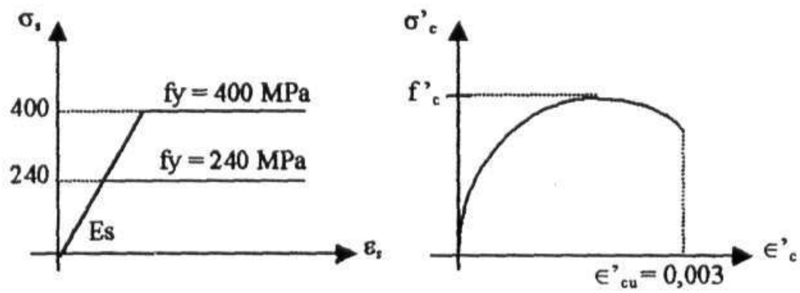
Pada skripsi ini diperkenalkan istilah β untuk mendisain kolom-kolom dengan beban aksial P dan momen M (untuk kolom dengan eksetrisitas) tanpa memperhitungkan lagi faktor beban dan faktor reduksi kekuatan.

2.2 Asumsi-Asumsi Dasar Perencanaan Kolom

Asumsi yang digunakan dalam perencanaan kekuatan kolom dievaluasi berdasarkan prinsip-prinsip sebagai berikut:

- Penampang tegak lurus pada sumbu terjadinya momen tetap datar sebelum dan sesudah mengalami lenturan

- Regangan di dalam baja tulangan dan beton dianggap berbanding lurus dengan jarak terhadap garis netral
- Regangan maksimum yang dapat dipakai pada serat tekan terluar penampang beton diambil 0,003
- Kuat tarik beton diabaikan di dalam perhitungan
- Hubungan tegangan - regangan baja dan beton dapat dinyatakan secara skematis



Gambar 2.1 Diagram skematis hubungan regangan dan tegangan untuk beton dan baja

Pada beton, bahwa regangan maksimum sebesar 0,003 diambil sebagai regangan pada serat tekan terluar beton yang menerima beban lentur dan retak-retak yang ditimbulkan kecil atau bahkan masih belum terlihat meskipun regangan ini lebih besar daripada regangan pada saat terjadi tegangan maksimum. Regangan ini yang direkomendasikan oleh ACI. Bentuk kurva tegangan regangan beton diambil dari percobaan beton silinder yang dibebani uniaksial tekan("*Unconfined Concrete*").

Pada baja, bentuk kurva tegangan regangan yang diambil adalah sebagai dua garis lurus seperti pada gambar, dengan mengabaikan tegangan leleh atas dan peningkatan tegangan yang terjadi setelah mencapai kondisi leleh. Penyederhanaan ini cukup akurat untuk baja yang mempunyai tegangan leleh rendah karena regangan plastis yang terjadi setelah leleh sangat besar sehingga pada saat beton mencapai regangan maksimumnya, tegangan baja masih menunjukkan pada kondisi lelehnya (fy).

- Pada perhitungan kapasitas kolom beton bertulang disini tidak disertakan pengaruh daktilitas dari adanya pemakaian sengkang sehingga perhitungan tingkat keandalan untuk bangunan tingkat tinggi hasilnya kurang akurat.

2.3 Faktor Reduksi Kekuatan, Faktor Beban & Faktor Reduksi Beban

Faktor reduksi kekuatan dan faktor beban yang dipakai untuk perencanaan suatu kolom diatur di dalam SKSNI pasal 3.2.3-2.2 dan SKSNI pasal 3.2.2., sedangkan faktor reduksi beban hidup diatur di dalam PPIURG. Perencanaan yang dilakukan pada skripsi ini tidak memakai faktor reduksi kekuatan, faktor beban dan faktor reduksi beban untuk menghitung kombinasi pembebanan yang paling berbahaya, tetapi memakai faktor β yang menunjukkan tingkat keandalan tertentu.

2.4 Panjang Kolom

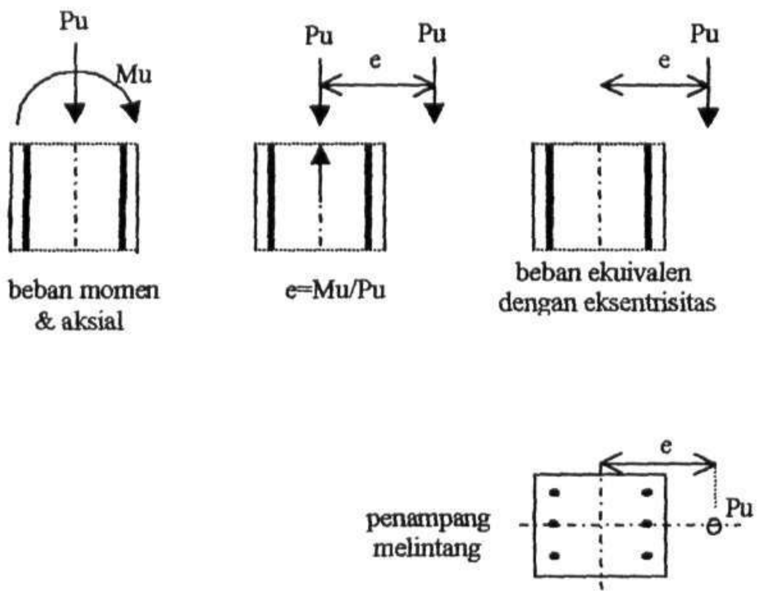
Besarnya panjang kolom (ln) diambil sesuai dengan SKSNI pasal 3.3.11-1.

2.5 Pembatasan Penulangan Kolom

Pembatasan ini diatur di dalam SKSNI pasal 3.3.9-1 dengan rasio tulangan kolom diisyaratkan untuk tidak kurang dari 0,01 dan tidak lebih dari 0,08 kali luas bruto penampang kolom.

2.6 Kolom Tidak Langsing

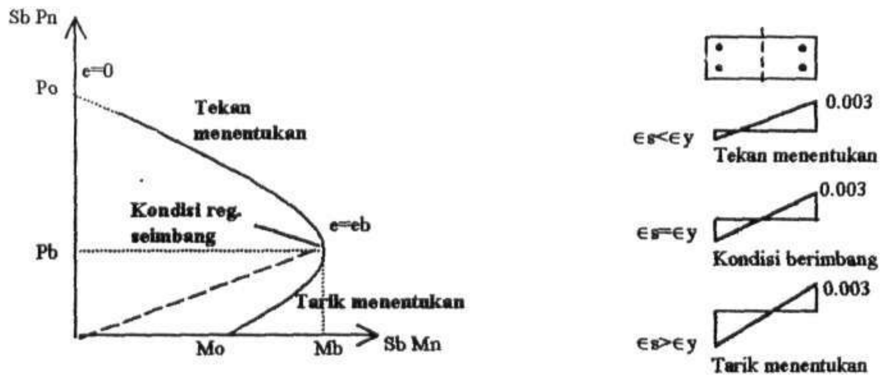
Suatu unsur struktur dapat dibebani dengan kombinasi lentur dan beban aksial di dalam banyak cara. Momen lentur yang terjadi umumnya diakibatkan oleh beban lantai yang tidak seimbang pada kolom luar dan dalam, akibat beban eksentris seperti beban keran dalam bangunan industri, atau akibat beban lateral seperti angin dan gempa. Di dalam kenyataannya jarang terjadi pembebanan kolom yang betul-betul konsentris (hanya menerima beban aksial saja). Kolom harus diperhitungkan terhadap eksentrisitas yang minimum (yang tak terduga) yang dapat terjadi dalam kondisi ujung, variasi dalam bahan, atau yang lainnya, sekalipun beban secara teoritis adalah konsentris. Menurut ACI eksentrisitas minimum yang harus diberikan adalah 0,1.h untuk kolom bersengkang.



Gambar 2.2 Beban kolom eksentris dengan penampang persegi

Perlu untuk dicatat bahwa pada suatu penampang selalu terdapat jumlah kombinasi kekuatan yang tak terhingga yang mana Pn dan Mn bekerja bersamaan.

Kombinasi-kombinasi dari kekuatan ini terletak pada suatu kurva seperti terlihat pada gambar di bawah ini, yang dinamakan diagram interaksi kekuatan (*strength interaction diagram*). Kondisi regangan berimbang dalam kombinasi lentur dan beban aksial diberikan oleh titik dengan Pn=Pb dan Mn=Mb pada diagram di bawah ini.

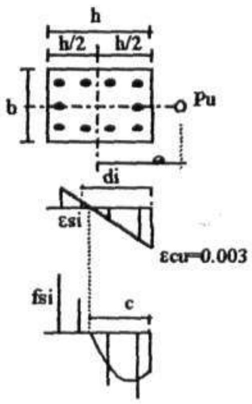


Gambar 2.3 Diagram interaksi kekuatan untuk tekan aksial dan momen lentur pada satu sumbu

Pada diagram juga terlihat bahwa garis radial dari titik awal (Pn=0,Mn=0) memberikan perbandingan yang tetap dari Mn terhadap Pn, yakni yang memberikan eksentrisitas e dari beban Pn terhadap titik pusat plastic (Plastic Centroid).

2.7 Kolom Penampang Persegi dengan Tulangan pada Keempat Sisinya

Kolom dengan tulangan yang tersebar pada keempat sisinya, akan menjadikan persamaan untuk perencanaan dan analisa kekuatan semakin sulit. Hal ini disebabkan karena kemungkinan tegangan yang terjadi pada masing-masing tulangan berbeda sesuai dengan jaraknya terhadap garis netral. Tetapi analisa kekuatan dari kolom ini tetap dapat dilakukan yaitu dengan menggunakan persamaan kompatibilitas dan kesetimbangan (*Park and Paulay, 1975*).



Gambar 2.4 Diagram tegangan dan regangan pada penampang kolom beton bertulang

Persamaan kompatibilitas

Secara umum tul ke-i pada penampang mempunyai regangan

$$\varepsilon si = 0{,}003.\frac{c - di}{c} \quad \text{...(1)}$$

dengan regangan tekan bertanda positif (+) & regangan tarik bertanda negatif (-).

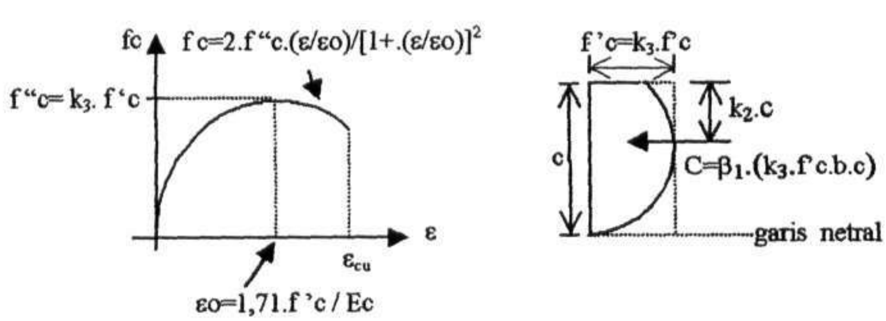
Sedangkan untuk tegangan ke-i (fsi) diberikan dengan kondisi di bawah ini,

a. $\varepsilon si \geq fy/Es$, maka $fsi = fy$ ....(2a)

b. $-fy/Es < \varepsilon si < fy/Es$, maka $fsi = \varepsilon si.Es$ ....(2b)

c. $\varepsilon si \leq -fy/Es$, maka $fsi = -fy$ ....(2c)

Gaya yang bekerja pada tulangan ke-i adalah sebesar fsi.Asi, di mana Asi adalah luas tulangan total ke-i.



Gambar 2.5 Kurva regangan-tegangan tekan beton Todeschini (*MacGregor, 1992*)

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

$$\beta_1 = \frac{\ln(1+x^2)}{x}$$

$$k_2 = 1 - \frac{2.(x - \tan^{-1} x)}{x^2 \beta_1}$$

$k_3 = 0,85$

di mana :

ε = regangan beton

εo = regangan beton pada tegangan maksimum

β_1 = perbandingan antara tegangan tekan rata-rata terhadap tegangan maksimum

k_2 = perbandingan jarak serat tekan terluar sampai resultan gaya tekan terhadap tinggi garis netral (c).

k_3 = perbandingan antara tegangan maksimum f"c dalam daerah tekan dari kolom terhadap kuat tekan beton silinder, f'c.

<u>Persamaan kesetimbangan</u>

$$Pu = 0,85.f'c.a.b + \sum_{i=1}^{n} fsi.Asi \quad \text{..................(3)}$$

$$Pu.e = 0,85.f'c.a.b.(\frac{h}{2} - k_2.c) + \sum_{i=1}^{n} fsi.Asi.(\frac{h}{2} - di) \quad \text{................(4)}$$

dengan $a = \beta_1.c$

Kemudian dilakukan pendekatan *'trial and error'* dan penyesuaian untuk mencari solusinya. Di bawah ini diberikan contoh prosedur perhitungan yang dilakukan untuk mencari beban ultimit dari penampang kolom yang telah ditentukan dengan eksentrisitas tertentu,

1. memilih sebuah nilai untuk c (jarak sumbu netral dari serat tekan terluar)

2. menghitung tegangan tulangan terpasang dengan persamaan (1),(2a-c)

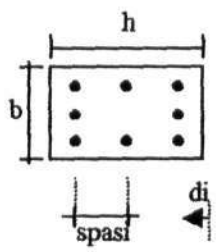
3. menghitung Pu dengan persamaan (3),(4)

4. mengulangi langkah 1,2,3 sampai nilai Pu yang didapat dari persamaan (3) dan (4) menunjukkan nilai yang sama.

Yang perlu diingat adalah tegangan pada daerah tulangan yang tertekan harus direduksi sebesar 0,85 f'c jika luasan beton tertekan yang diganti oleh luasan tulangan yang terpasang diperhitungkan. Jadi besar tegangan tulangan pada baris ke-i adalah sebesar (fsi-0,85.f'c) jika di < c.

Rumus di atas juga digunakan untuk mencari kapasitas kolom dengan tulangan hanya pada dua sisi dan kapasitas kolom yang menerima beban aksial tarik dan momen.

Untuk menentukan posisi tulangan (di) dan jumlah tulangan terpasang pada lapis ke-i maka dapat dipakai rumus berikut ini.



Gambar 2.6 Formasi Tulangan 4 sisi

m = jumlah tulangan

n = m/4+1 = jumlah lapis tulangan terpasang

di = jarak tulangan pada lapis ke-i dari serat tertekan terluar

$\sum$Asi = jumlah tulangan yang terpasang pada lapis ke-i

Øtu = diameter tul. utama, Øs = diameter sengkang, p = tebal selimut beton

untuk i = 1 s/d n, maka

di = [(h-2.(p+Øs+0.5 Øtu)].(i-1) / (n-1)+ (p+Øs+0.5 Øtu)

$\sum As_1 = n$, $\sum As_3 = n$, untuk i=2 s/d (n-1) maka $\sum$Asi=2

Syarat spasi minimum tulangan terpasang adalah

$$[b-2.(p+\varnothing s)-n.\ \varnothing tu] / [n-1] \geq 25 \text{ mm}$$

2.8 Kolom Langsing

Suatu kolom disebut kolom langsing apabila kolom tersebut mempunyai kelangsingan tertentu yang tidak mungkin diabaikan, yang mana kekuatan unsur tidak ditentukan oleh kekuatan bahan melainkan oleh tekuk kolom.

Kelangsingan suatu kolom dapat diabaikan jika perbandingan panjang elemen terhadap jari-jari girasi adalah

- untuk kolom dengan pengaku samping

$$\frac{k.ln}{r} < 34 - 12\frac{M1b}{M2b}$$

- untuk kolom tanpa pengaku samping

$$\frac{k.ln}{r} < 22$$

dengan,

k = faktor tekuk kolom

r = radius girasi penampang kolom yang ditinjau

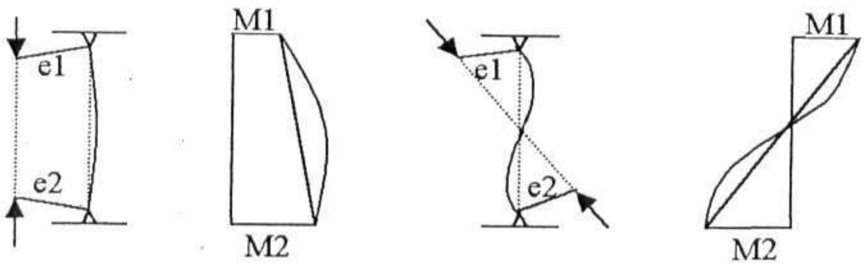
$$= \left(\sqrt{\frac{I}{A}}\right)_{bruto}$$

ln = panjang kolom netto

M1b dan M2b = momen batas ujung-ujung kolom yang tidak menyebabkan goyangan ke samping dengan $|M1b| < |M2b|$

Catatan: jika M1b/M2b > 0 maka terjadi " single curvature"

jika M1b/M2b< 0 maka terjadi "double curvature"



Gambar 2.7 "Single curvature" dan "double curvature" pada kolom

Pada kolom langsing terjadi momen sekunder yang dapat memperbesar momen primer. Untuk itu di dalam perhitungan diperlukan faktor pembesaran momen yang harus diperhitungkan terhadap panjang tekuk kolom.

Untuk kolom dengan pengaku samping maupun tanpa pengaku samping, jika k.ln/r > 100 maka analisa kolom langsing harus dengan memperhitungkan pengaruh dari beban aksial dan variasi dari momen inersia pada kekakuan komponen struktur dan pada momen jepit ujungnya, pengaruh dari lendutan pada momen dan gaya, serta pengaruh lamanya pembebanan. Perhitungan ini tidak dibahas karena umumnya jarang dijumpai dalam perencanaan.

Kolom dengan pengaku samping

Batasan umum yang biasa digunakan untuk membedakan kolom dengan pengaku samping atau tanpa pengaku samping tergantung dari penilaian si perenncana sendiri.. Dalam hal ini misalnya dengan adanya suatu dinding geser, core, atau pengaku diagonal yang mempunyai kekakuan total minimum 6 kali jumlah kekakuan semua kolom pada tingkat tersebut, kolom tersebut dapat didefinisikan sebagai kolom dengan pengaku samping.

Kolom tanpa pengaku samping

Apabila kolom tidak memenuhi 2 kriteria di atas yakni kekakuan yang menahan goyangan kolom tidak mencukupi yang disyaratkan, maka kolom dinyatakan tanpa pengaku samping. Perbedaan kolom dengan atau tanpa pengaku samping adalah pada pembatasan dan perhitungan besarnya faktor tekuk kolom.

Panjang tekuk kolom

Panjang tekuk kolom adalah panjang kolom (ln) dikalikan dengan faktor tekuk (k). Faktor k adalah fungsi dari faktor jepitan ujung atas kolom μA dan ujung bawah kolom μB. Harga μ diperoleh dari persamaan: $\varphi = \dfrac{\sum [EI/ln]_{kolom}}{\sum [EI/ln]_{balok}}$

dengan:

μ = faktor jepitan ujung kolom

EI/ln = faktor kekakuan kolom atau balok yaitu modulus elastisitas dan momen inersia terhadap penjang elemen pada arah yang ditinjau.

Dengan memasukkan nilai-nilai di atas untuk ujung atas (A) dan ujung bawah kolom (B) diperoleh nilai μA dan μB. Dan dengan menggunakan rumus yang diusulkan oleh Cranston dan Furlong diperoleh nilai k untuk masing-masing kondisi baik kolom pada rangka dengan pengaku samping atau tanpa pengaku samping.

Pengaruh kolom pada rangka dengan pengaku samping atau tanpa pengaku samping yaitu pada panjang tekuknya.

$k \leq 1$ untuk kolom dengan pengaku samping

$k > 1$ untuk kolom tanpa pengaku samping

Perhitungan faktor pembesaran momen untuk kolom langsing

Faktor pembesaran momen ini diatur dalam SKSNI pasal 3.3.11-5 dengan persamaan-persamaan sebagai berikut:

$Mc = \delta b.M2b + \delta s.M2s$

di mana:

- Mc adalah momen rencana kolom setelah memperhitungkan kelangsingan kolom
- M2b adalah momen terfaktor terbesar pada ujung kolom akibat beban yang tidak menimbulkan goyangan ke samping yang berarti, misalnya momen akibat beban gravitasi.
- M2s adalah momen terfaktor terbesar pada ujung kolom akibat beban yang menimbulkan goyangan ke samping yang berarti, misalnya momen akibat gempa dan angin
- δb adalah faktor pembesaran momen untuk rangka yang ditahan terhadap goyangan ke samping. Faktor ini akibat pengaruh kelengkungan komponen struktur di antara ujung-ujung komponen struktur tekan.

  $\delta b = cm / (1 - Pu/Pc) \geq 1.0$
- δs adalah faktor pembesar momen untuk rangka yang tidak ditahan terhadap goyangan ke samping. Faktor ini akibat penyimpangan lateral akibat beban lateral dan gravitasi

  $\delta s = cm / (1 - \Sigma Pu/\Sigma Pc) \geq 1.0$
- $Pc = \pi^2.E.I / (k.ln.)^2$, dengan k adalah faktor tekuk dan ln adalah panjang kolom netto.
- ΣPu dan ΣPc adalah penjumlahan beban ultimit dan beban kritis dari semua kolom dalam satu tingkat.

Untuk kolom tanpa pengaku samping, kedua nilai δb dan δs harus dihitung, sedangkan untuk kolom dengan pengaku samping δs harus diambil = 1, hal ini mengingat kolom dengan pengaku samping cenderung tidak mengalami penyimpangan lateral.

Dalam menghitung Pc faktor tekuk k harus dihitung menurut pasal 3.3.11-2 yang mana untuk kolom dengan pengaku samping harus diambil sama dengan 1, kecuali bila analisa menunjukkan nilai yang lebih kecil dari 1. Sedangkan untuk kolom tanpa pengaku samping, nilai k harus ditentukan dengan memperhitungkan pengaruh dari keretakan dan tulangan terhadap kekakuan relatif. Hal ini menyangkut perhitungan faktor jepitan ujung kolom. Besar nilai k untuk kolom tanpa pengaku samping ini harus lebih besar dari 1.

- Nilai EI diambil yang terbesar dari 2 pers. berikut ini :

  $EI = (Ec.Ig/5 + Es.Ise)/(1 + \beta d)$ atau

  $EI = (Ec.Ig/2{,}5)/(1 + \beta d)$

- Ec adalah modulus elastisitas beton, di mana untuk beton normal diambil sebesar $4700.\sqrt{f'c}$ Mpa
- Ig adalah momen inersia bruto penampang kolom beton terhadap sumbu pusat dengan mengabaikan tulangan.
- Es adalah modulus elastisitas tulangan yang menurut SKSNI diambil sebesar 2.10^5 Mpa
- Ise adalah momen inersia tulangan terhadap sumbu pusat penampang kolom.
- βd untuk δb adalah rasio dari beban mati aksial maksimum terhadap beban aksial maksimum total. Sedangkan βd untuk δs adalah rasio M2b terhadap (M2b + M2s).

Untuk komponen struktur dengan pengaku samping dan tanpa beban transversal antara tumpuannya diambil : cm = 0,6 + 0,4.M1b/M2b ≥ 0,4, sedangkan untuk semua kasus lain cm harus diambil sebesar 1.

SKSNI pasal 3.3.11-5.4 mensyaratkan, bila eksentrisitas ujung yang didapat dari perhitungan kurang dari (15 + 0,03 h) mm, momen-momen ujung kolom yang didapat dari perhitungan boeh digunakan untuk menghitung M1b/M2b. Bila tidak terdapat momen pada ujung-ujung kolom, nilai M1b/M2b dapat diambil = 1.

Bila perhitungan menunjukkan bahwa pada kedua ujung kolom baik dengan atau tanpa pengaku samping tidak terdapat momen atau bahwa eksentrisitas ujung yang didapat dari perhitungan kurang dari (15 + 0,03 h) mm, M2b harus didasarkan dari eksentrisitas minimum sebesar (15 + 0,03 h) mm terhadap sumbu utama secara terpisah.

2.9 Diagram alir perencanan kolom beton bertulang

Desain kolom beton bertulang dengan tulangan 4 sisi

Dengan menggunakan persamaan kompatibilitas dan kesetimbangan (*Park and Paulay, 1975*), maka dapat dilakukan trial and error nilai c atau a untuk menghitung M_n, P_n sedemikian hingga $e_n = e_L = M_L/P_L$.

Proses ini dicoba untuk n (jumlah lapis) mulai dari 3 sampai dengan n_{max} yang dapat dipasang (untuk diameter tulangan tertentu). Setelah itu dilakukan pengecekan P_n dan M_n yang mana harus ≥ dari P_L dan M_L, dan juga pengecekan ρ dengan ρmin ≤ ρ ≤ ρmax. Yang memenuhi kedua syarat tersebut adalah hasil akhir desain.

Untuk analisa maka jumlah tulangan dan jumlah baris (n) harus pula diinputkan dan hasil akhir adalah P_n dan M_n.

Desain kolom beton bertulang dengan tulangan 2 sisi

Pada kondisi ini, juga dilakukan metode trial and error nilai c atau a (dengan persamaan seperti pada kondisi tulangan 4 sisi) untuk kondisi dimana P_n sama dengan P_L dan M_n sama dengan M_L.Setelah itu dihitung Ast (luas tulangan total). Perlu diketahui bahwa diameter tulangan yang diinputkan adalah hanya untuk menentukan besarnya d atau d'.

Untuk analisa maka jumlah tulangan harus pula diinputkan dan hasil akhir adalah P_n dan M_n.

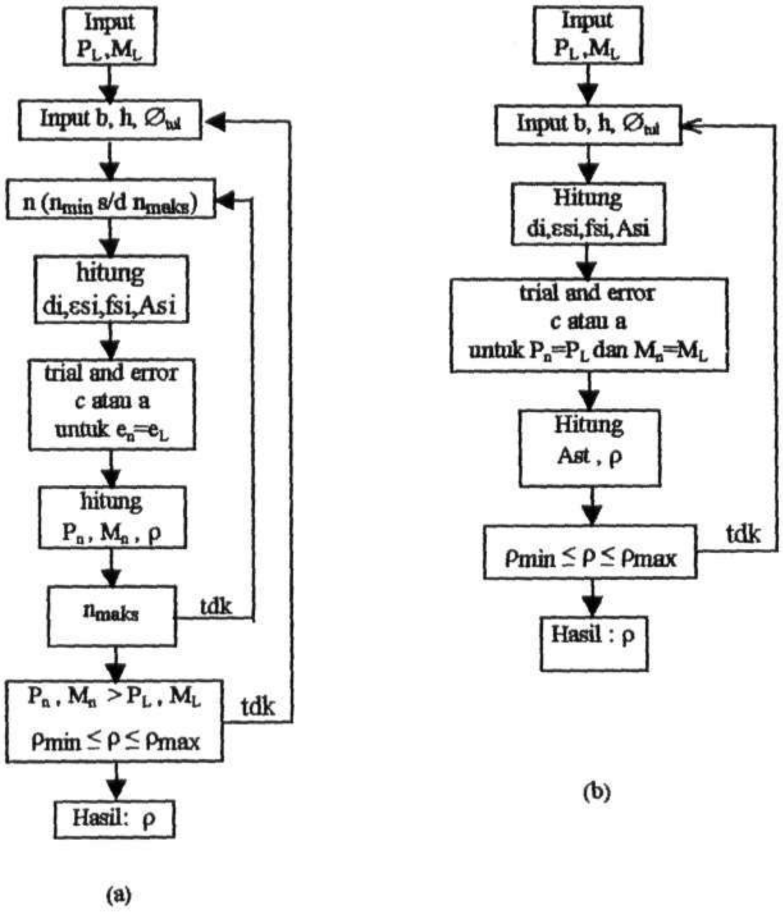


Diagram 2.1 Perencanaan kolom dengan tulangan 4 sisi (a) dan 2 sisi (b)