

BAB III

FORMULASI EFEK P-DELTA PADA STRUKTUR KOLOM

3.1 Konsep Dasar Efek P-Delta

Analisis dan perencanaan struktur, baik dengan perhitungan manual maupun menggunakan program aplikasi komputer dengan masukan beban gravitasi dan beban horisontal akan didapat besar gaya-gaya dalam (momen lentur, gaya lintang, gaya normal) dan defleksi yang terjadi. Perhitungan tersebut belum memasukkan pengaruh interaksi dari beban gravitasi dan beban horisontal yang bekerja secara bersamaan. Kenyataannya ketika beban horisontal bekerja pada struktur kolom atau dinding, maka struktur akan mengalami translasi, sehingga beban gravitasi yang bekerja mempunyai eksentrisitas terhadap sumbu kolom atau dinding. Akibat dari beban gravitasi P yang bekerja dengan eksentrisitas berupa anjakan horisontal sebesar Δ , dikenal dengan efek P-delta.

Pada kasus beban gravitasi besar dan struktur fleksibel akan menghasilkan tambahan gaya cukup besar yang memungkinkan struktur mengalami runtuh, sehingga diperlukan ketelitian dalam menentukan pembesaran anjakan dan momem akibat pengaruh P-delta.

Anjakan akibat beban lateral yang terjadi pada struktur menyebabkan beban gravitasi yang bekerja mempunyai eksentrisitas terhadap titik awal sehingga

menghasilkan penambahan momen eksternal. Analisis dasar untuk kondisi di atas dapat digambarkan sebagai berikut

Analisis orde pertama : $M = F.h$

Analisis orde kedua : $M = F.h + P.\Delta$

dengan

F : beban lateral

h : tinggi struktur

P : Gaya aksial akibat beban gravitasi

Δ : besar anjakan lateral

Defleksi yang terjadi akibat beban lateral saat gempa bumi mungkin sangat besar, disini efek P-delta menjadi sangat penting. Hal itu dapat dijelaskan dari keruntuhan beberapa gedung tinggi yang pernah terjadi (Eisenberg, 1994). Efek P-Delta perlu diperhatikan bila (ScarlatA.S,1991)

$$\text{koefisien stabilitas } 0 = \frac{P \Delta}{V h} > 0,10$$

dengan

Δ : defleksi

h : tinggi kolom

P : Gaya aksial vertikal

V : Gaya geser

Metode analisis P-delta yang umum dipakai adalah metode faktor pembesaran (“amplification factor”). Metode ini merupakan metode pendekatan yang cukup sederhana yaitu dengan menentukan faktor pembesaran yang akan

dipakai dalam seluruh perhitungan kapasitas struktur. Analisis efek P-delta yang lain adalah dengan melakukan modifikasi terhadap hasil analisis linear. Adapun langkah-langkah perhitungan akan dijelaskan pada bagian selanjutnya.

3.2 Faktor Pembesaran Akibat P-Delta

Aplikasi pengaruh efek P-delta yang umum dipakai karena cukup sederhana adalah dengan menentukan suatu faktor amplifikasi (“amplification factor”). Metode ini sering dipakai dalam perencanaan struktur baik struktur beton maupun struktur baja terutama yang menggunakan komponen elemen kolom langsing.

SK-SNI T-15-1991, memberikan analisis perkiraan yang didasarkan pada faktor pembesaran momen sebagai suatu evaluasi pendekatan. Tingkat kelangsingan kolom diungkapkan sebagai rasio kelangsingan, kl/r , dimana k adalah faktor panjang efektif komponen struktur tekan (kolom), l adalah panjang kolom yang tidak dikekang dan r adalah jari-jari putar (“radius of gyration”) tampang kolom.

Perencanaan komponen struktur tekan dengan menggunakan cara pembesaran momen dapat dipakai apabila nilai rasio kelangsingan $kl/r < 100$. Apabila nilai $kl/r > 100$, maka perencanaan harus menggunakan analisis orde kedua yang cukup rumit karena harus memperhitungkan efek defleksi dan menggunakan reduksi modulus tangen beton. Meskipun sebenarnya SNI Beton 1991 mendorong untuk berani melakukan analisis non linier yang terdapat pada ayat 3.3.10 yang menyebutkan :

1. Perencanaan dari komponen struktur tekan harus didasarkan pada gaya dan momen yang didapat dari analisis struktur yang ditinjau. Analisis tersebut harus 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* dan pengaruh dari lamanya pembebanan.
2. Bila prosedur yang ditentukan pada butir pertama tidak diikuti, maka pengaruh dari kelangsingan pada komponen struktur tekan boleh diperhitungkan berdasarkan *prosedur pendekatan* yang diberikan dalam ayat 3.3.11

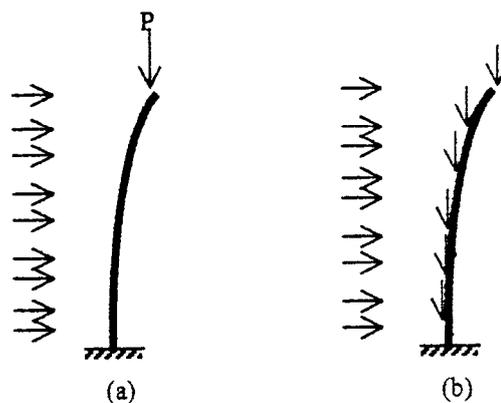
Anjakan horisontal pada sebuah elemen kantilever vertikal akibat beban lateral dan terdapat beban vertikal terpusat P pada bagian bebas kantilever (Gambar 3.1), akan mengalami pembesaran dengan faktor pembesaran sebesar F

$$F = \frac{1}{1 - \left(\frac{P}{P_{1cr}}\right)} \quad (3.1)$$

dengan

P_{1cr} : beban tekuk kritis pada puncak elemen kantilever.

P : beban rencana aksial



Gambar 3.1 (a) Kolom kantilever dengan beban lateral dan beban aksial terpusat
(b) Kolom kantilever dengan beban lateral dan beban aksial terdistribusi

Anjakan akhir dengan amplifikasi/pembesaran adalah

$$\Delta^* = F\Delta = \frac{1}{1 - \left(\frac{P}{P_{icr}}\right)} \cdot \Delta \quad (3.2)$$

dengan

Δ^* : anjakan akhir dengan faktor pembesaran,

F : faktor pembesaran,

Δ : anjakan awal dengan analisis tingkat pertama.

Akibat efek P-delta juga menyebabkan penambahan momen internal, maka momen M struktur pada analisa tingkat satu akan mengalami pembesaran akibat pengaruh perhitungan tingkat dua menjadi M^* , yaitu

$$M^* = \frac{1}{1 - \left(\frac{P}{P_{icr}}\right)} \cdot M \quad (3.3)$$

dengan

M^* : Momen akhir dengan faktor pembesaran,

M : Momen awal,

P : Beban aksial rencana,

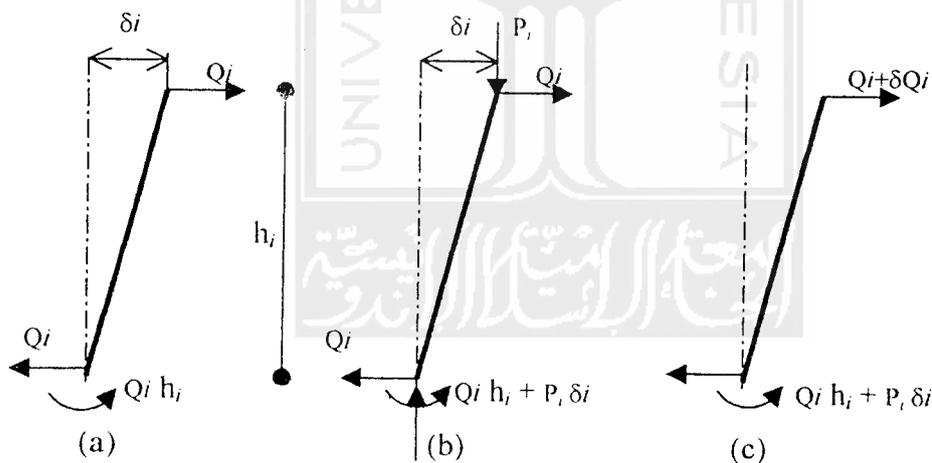
P_{cr} : Beban tekuk kritis.

Beban tekuk kritis dapat dicari dengan meninjau masing-masing mode deformasi yang mungkin terjadi pada struktur sebagaimana dijelaskan pada bagian 2.4.1, 2.4.2 dan 2.4.3.

3.3 Iterasi P-Delta

Pada kasus beban gravitasi besar dan struktur yang cukup lentur, pemakaian metode faktor pembesaran tidak sesuai lagi, untuk itu diperlukan metode analisis yang lebih akurat, yaitu dengan iterasi efek P-delta.

Untuk menentukan penambahan beban horisontal yang merupakan fungsi dari beban gravitasi dilakukan dengan mengikuti langkah berikut. Pada gambar 3.2 dapat dijelaskan bahwa setelah melakukan perhitungan analisis orde pertama pada tingkat i yang bekerja beban horisontal sebesar Q_i , mengakibatkan anjakan pada ujung atas tingkat sebesar δ_i . Beban gravitasi yang bekerja dengan eksentrisitas δ_i memberikan tambahan beban horisontal sebesar δQ_i dan menyebabkan penambahan momen pada bagian bawah tingkat sebesar $P_i \delta_i$.



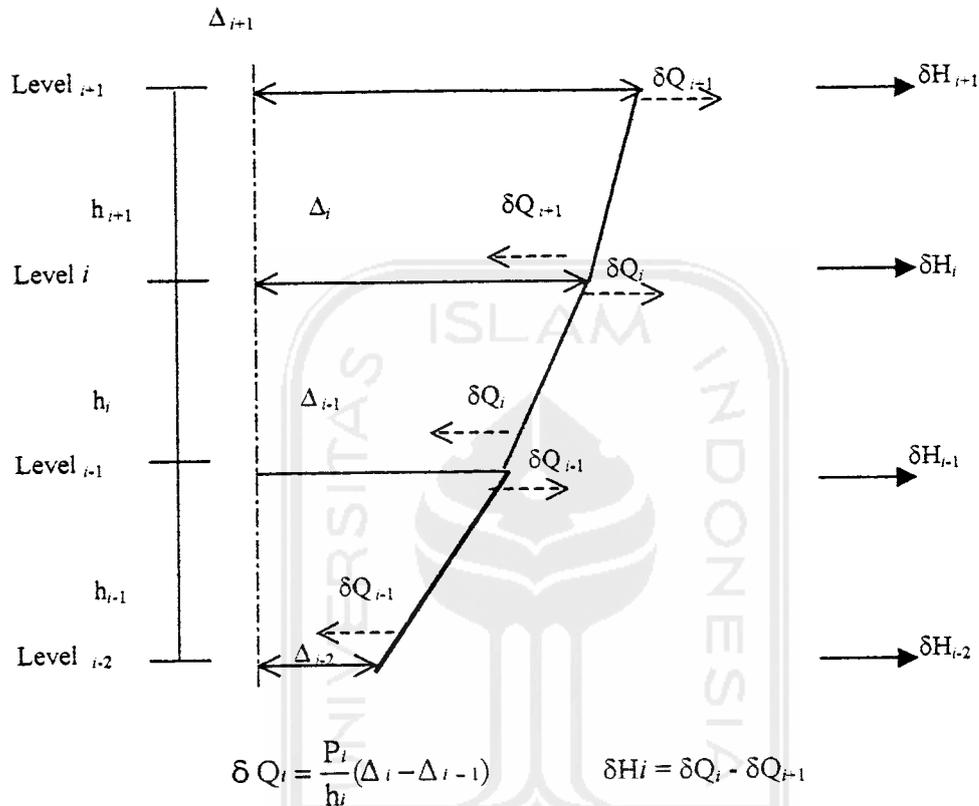
Gambar 3.2 (a) Kolom mengalami anjakan akibat gaya geser Q_i
 (b) Penambahan beban aksial pada kolom yang telah mengalami anjakan
 (c) Persamaan beban horisontal

Berdasarkan persamaan penambahan beban horisontal memberikan

$$\delta Q_i = \frac{P_i \delta_i}{h_i} \quad (3.4)$$

$$\delta Q_i = \frac{P_i}{h_i}(\Delta_i - \Delta_{i-1}) \quad (3.5)$$

$$\delta H_i = \delta Q_i - \delta Q_{i-1} \quad (3.6)$$



Gambar 3.3 Diagram penambahan beban lateral

Setelah analisis orde pertama dilakukan dan didapat anjakan sebesar Δ_i , selanjutnya beban gravitasi dipakai untuk menentukan tambahan beban horisontal yang akan memberikan tambahan anjakan sebesar δ_{i1} . Dengan prosedur yang sama sesuai dengan gambar 3.2 akan didapat tambahan anjakan berikutnya δ_{i2} , δ_{i3} , δ_{in} . Anjakan total pada tingkat i dengan memasukkan pengaruh P-delta merupakan jumlah dari anjakan awal hasil analisa perhitungan orde pertama ditambah dengan jumlah semua penambahan anjakan.

Atau dapat ditulis

$$\Delta_i^* = \Delta_i + \delta_{i1} + \delta_{i2} + \delta_{i3} + \dots \quad (3.7)$$

Momen akhir pada tingkat i , M_i^* dengan memasukkan pengaruh P-delta adalah jumlah dari momen hasil perhitungan orde pertama ditambah dengan perbesaran momen δM_i , atau dengan analisis iterasi didapat

$$M_i^* = M_i + \delta M_{i1} + \delta M_{i2} + \delta M_{i3} + \dots \quad (3.8)$$

Pada analisis orde pertama, dengan hanya meninjau beban horisontal, kekakuan struktur pada tingkat i adalah

$$K_i = Q_i / \delta_i$$

Gaya geser efektif merupakan hasil dari beban horisontal awal ditambah dengan tambahan beban horisontal yang merupakan fungsi dari beban gravitasi adalah

$$Q_i^* = Q_i + \delta Q_i = Q_i + \frac{P_i Q_i}{h_i} \quad (3.9)$$

Besar anjakan akhir akan didapat

$$\delta_i^* = [Q_i + (P_i \delta_i^* / h_i)] / K_i \quad (3.10)$$

$$\delta_i^* = [Q_i + (P_i \delta_i / h_i)] / [Q_i / \delta_i] \quad (3.11)$$

$$\delta_i^* = \frac{1}{1 - \left(\frac{P_i \delta_i}{h_i} \right)} \quad (3.12)$$

Pembesaran momen pada tingkat i dengan memasukkan efek P-delta akan didapat

$$M_i^* = \frac{1}{1 - \left(\frac{P_i \delta_i}{h_i} \right)} M_i \quad (3.13)$$

dengan M_i adalah momen struktur pada tingkat i hasil perhitungan analisis orde pertama.

Pada metode iterasi ini dipakai prinsip-prinsip analisis linear yang telah dikenal luas dan mudah untuk dipelajari. Untuk melakukan analisis linear tersebut metode yang disarankan untuk dipakai adalah metode matriks kekakuan atau metode elemen hingga yang saat ini telah tersedia paket program komputernya. Untuk memperhitungkan pengaruh P-delta, hasil yang diperoleh dari analisis linear tersebut perlu dimodifikasi. Adapun langkah-langkah yang ditempuh maupun modifikasi yang harus dilakukan dalam metode ini akan diuraikan sebagai berikut :

1. Menghitung gaya-gaya dalam (momen lentur, gaya lintang, dan gaya normal) dan lendutan akibat beban luar (beban vertikal dan horisontal) pada portal yang ditinjau dengan prinsip analisis linear. Lendutan horisontal pada lantai ke- i diberi notasi Δ_i (gambar 3.2 dan 3.3) dan beban horisontal lantai ke- i diberi notasi H_i .
2. Karena setiap lantai telah mengalami mengalami lendutan horisontal, maka beban vertikal (aksial) yang bekerja pada kolom ke- i akan menimbulkan momen sekunder M_{s_i} sebesar :

$$M_{s_i} = (\Sigma P_i) (\Delta_{i+1} - \Delta_i)$$

dengan ΣP_i = gaya aksial total lantai ke- i

Momen sekunder tersebut seolah-olah mengakibatkan penambahan gaya lintang pada ujung-ujung kolom ke- i sebesar

$$V_i' = \frac{M_{s_i} = (\Sigma P_i) (\Delta_{i+1} - \Delta_i)}{h_i}$$

dengan h_i = tinggi lantai ke- i .

Maka besarnya pertambahan gaya horisontal yang dirasakan oleh lantai ke-i

$$H_i' = V'_{i-1} - V_i'$$

3. Selanjutnya, untuk setiap lantai, H_i' yang diperoleh kemudian ditambahkan pada gaya horisontal awal (langkah a) $H^* = H_1 + H_i'$.

Berdasarkan gaya horisontal terbaru tersebut (gaya vertikal masih tetap sama), portal yang ditinjau dianalisis lagi untuk memperoleh lendutan yang baru.

4. Langkah (b) dan (c) tersebut dilakukan beberapa kali sampai pada kondisi konvergen, yaitu kondisi bila hasil lendutan horisontal setiap lantai pada iterasi ke (n-1) telah sama atau hampir sama dengan hasil iterasi ke (n). Gaya-gaya dalam dan lendutan yang diperoleh pada kondisi konvergen tersebut merupakan hasil akhir yang telah mencakup efek P-delta.

