

BAB IV

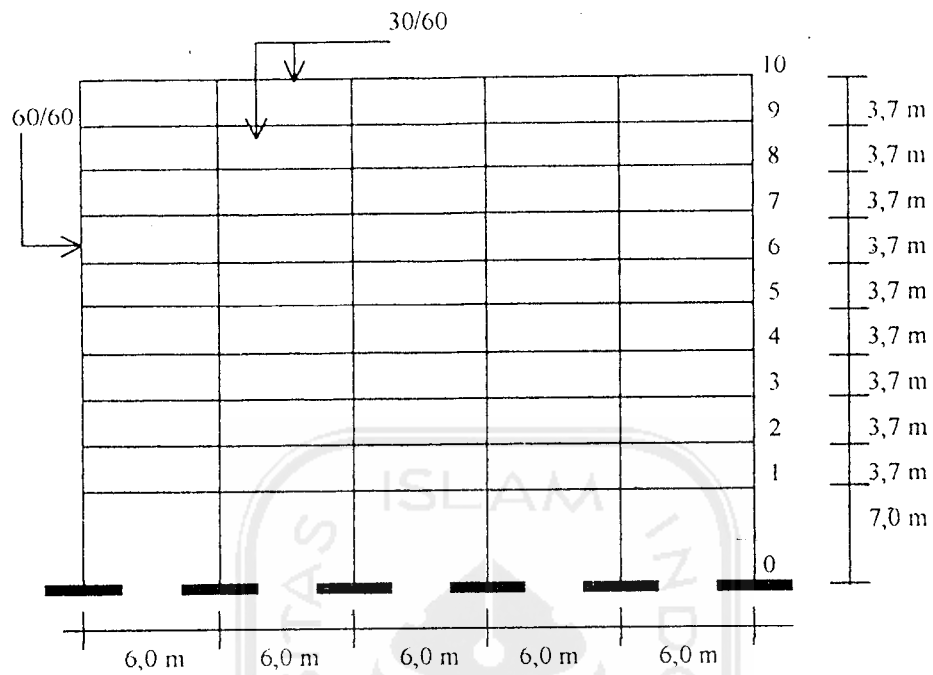
APLIKASI ANALISIS EFEK P-DELTA

4.1 Data Perencanaan

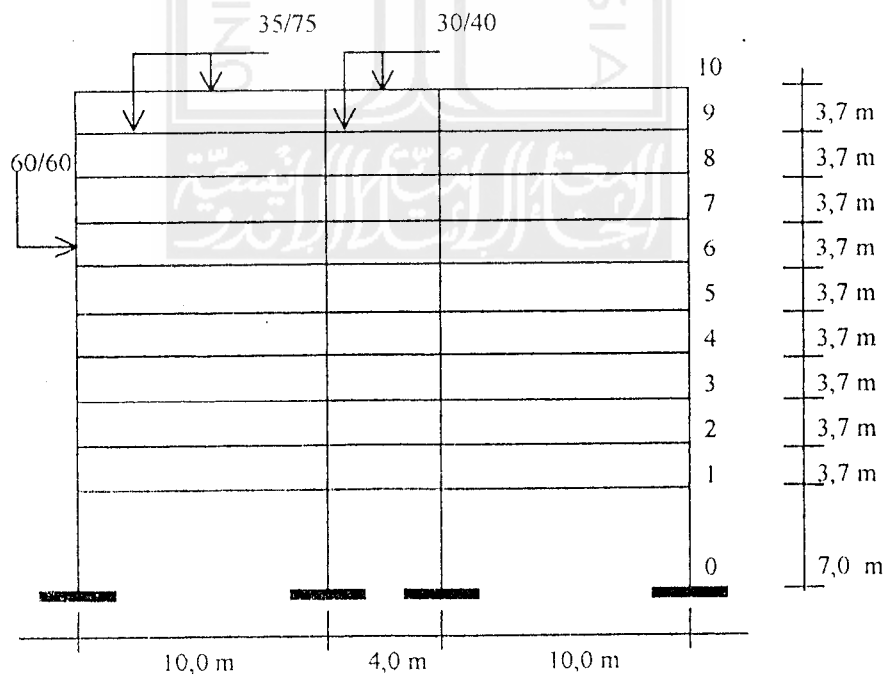
Persyaratan umum portal beton bertulang yang akan dianalisis meliputi jenis dan lokasi bangunan, tipe pembebanan, mutu atau kualitas bahan struktur yang digunakan serta denah dan dimensi elemen utama struktur portal. Jenis bangunan yang akan dianalisis adalah bangunan perkantoran dengan lokasi bangunan terletak di daerah gempa 2 pada peta wilayah gempa untuk Indonesia dan terletak di atas tanah lunak, sehingga dengan asumsi di atas diharapkan bangunan akan mengalami beban lateral yang cukup besar.

Beban yang bekerja meliputi beban hidup, beban mati dan beban gempa. Beban hidup dan beban mati struktur diambil menurut ketentuan Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung 1983, sedangkan beban gempa yang bekerja diambil sesuai dengan Peraturan Tahan Gempa Untuk Gedung Indonesia dan dihitung dengan cara statis ekuivalen.

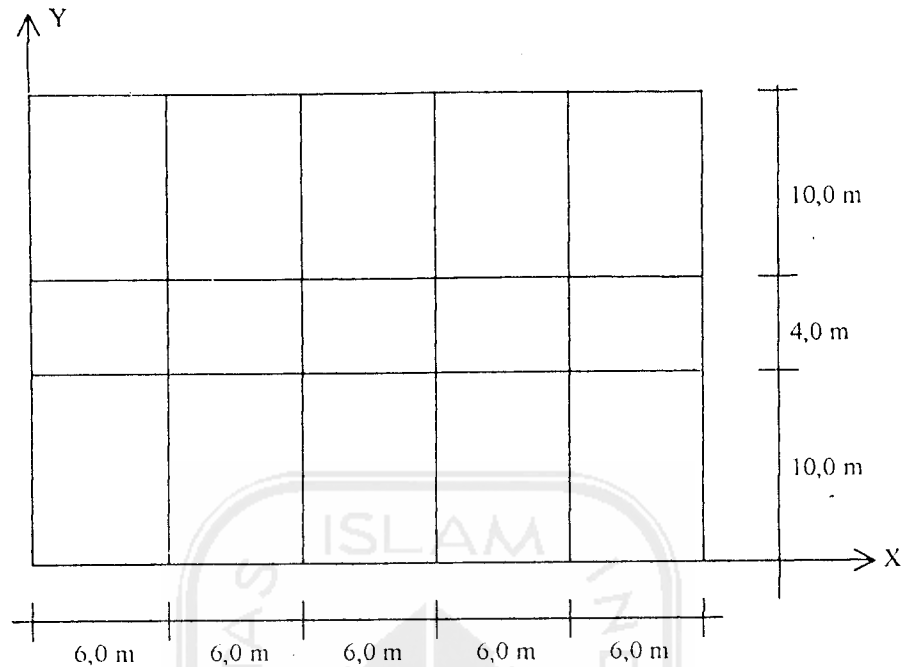
Struktur yang akan dianalisis adalah struktur beton bertulang 10 lantai. Mutu bahan yang dipakai yaitu mutu beton $f_c = 30$ Mpa dan mutu baja tulangan $f_y = 400$ Mpa. Tebal pelat lantai diasumsikan 130 mm dan tebal pelat atap 120 mm, sedang dimensi kolom dan balok untuk masing-masing portal diasumsikan seperti pada gambar-gambar berikut ini.



Gambar 4.1 Portal 10 lantai arah sumbu x



Gambar 4.2 Portal 10 lantai arah sumbu y



Gambar 4.3 Denah lantai 1 – lantai 10 (tipikal)

4.2 Perhitungan Gaya-gaya yang Bekerja pada Struktur

4.2.1 Distribusi Gaya Geser Dasar Horizontal Total Akibat Gempa

1. Berat bangunan total (Wt)

a. Lantai 10 (atap)

Beban mati

$$\sim \text{plat atap} = 30 \cdot 24 \cdot 0,12 \cdot 2,4 = 207,360 \text{ ton}$$

$$\sim \text{balok atap} = [(20 \cdot 6 \cdot 0,30 \cdot 0,48) + (12 \cdot 10 \cdot 0,35 \cdot 0,63) + (6 \cdot 4 \cdot 0,30 \cdot 0,28)] \cdot 2,4 = 109,814 \text{ ton}$$

$$\sim \text{dinding (sepanjang balok)} = 264 \cdot 1,85 \cdot 0,25 = 122,100 \text{ ton}$$

$$\sim \text{plafon} = 30 \cdot 24 \cdot (0,011 + 0,007) = 12,960 \text{ ton}$$

$$\begin{aligned}
 \sim \text{air hujan (2 cm)} &= 30 \cdot 24 \cdot 0,02 \cdot 1,0 &= 14,400 \text{ ton} \\
 \sim \text{kolom} &= 24 \cdot 0,60 \cdot 0,60 \cdot 1,85 \cdot 2,4 &= 38,362 \text{ ton} \\
 \hline
 W_m &= 504,996 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

Beban hidup

$$\sim q_h \text{ atap} = 100 \text{ kg/m}^2$$

$$\sim \text{koeffisien reduksi} = 0,3$$

$$W_h = 0,3 \cdot 30 \cdot 24 \cdot 0,10 = 21,60 \text{ ton}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat total } W_{10} &= W_m + W_h \\
 &= 504,996 + 21,60 = 526,596 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

b. Lantai 9

Beban mati

$$\sim \text{plat lantai} = 30 \cdot 24 \cdot 0,13 \cdot 2,4 = 224,640 \text{ ton}$$

$$\begin{aligned}
 \sim \text{balok lantai} &= [(20 \cdot 6 \cdot 0,30 \cdot 0,47) + (12 \cdot 10 \cdot 0,35 \cdot 0,62) + \\
 &\quad (6 \cdot 4 \cdot 0,30 \cdot 0,27)] \cdot 2,4 = 107,770 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

$$\sim \text{dinding} = 264 \cdot 3,7 \cdot 0,25 = 244,200 \text{ ton}$$

$$\sim \text{plafon} = 30 \cdot 24 \cdot (0,011 + 0,007) = 12,960 \text{ ton}$$

$$\sim \text{pasir (5 cm)} = 30 \cdot 24 \cdot 0,05 \cdot 1,6 = 57,600 \text{ ton}$$

$$\sim \text{spesi (2 cm)} = 30 \cdot 24 \cdot 0,02 \cdot 2,1 = 30,240 \text{ ton}$$

$$\begin{aligned}
 \sim \text{tegel (2 cm)} &= 30 \cdot 24 \cdot 0,02 \cdot 2,4 &= 34,560 \text{ ton} \\
 \hline
 &= 711,970 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

$$\sim \text{kolom} = 24 \cdot 0,60 \cdot 0,60 \cdot 3,7 \cdot 2,4 = 76,723 \text{ ton}$$

$$W_m = 788,693 \text{ ton}$$

Beban hidup

$$\sim q_h \text{ lantai} = 250 \text{ kg/m}^2$$

$$\sim \text{koefisien reduksi} = 0,3$$

$$W_h = 0,3 \cdot 30 \cdot 24 \cdot 0,25 = 54 \text{ ton}$$

$$\text{Berat total } W_9 = W_m + W_h$$

$$= 788,693 + 54 = 842,693 \text{ ton}$$

c. Lantai 1

Beban mati

$$W_m = 711,970 + (24 \cdot 0,60 \cdot 0,60 \cdot 5,35 \cdot 2,4) = 822,908 \text{ ton}$$

Beban hidup

$$W_h = 54 \text{ ton}$$

$$\text{Berat total } W_1 = 822,908 + 54$$

$$= 876,908 \text{ ton}$$

d. Berat total bangunan

$$W_t = W_{10} + 8(W_9) + W_1$$

$$= 526,364 + 8(842,693) + 876,908 = 8144,816 \text{ ton}$$

2. Waktu getar bangunan (T)

Dengan rumus empiris $T_x = T_y = 0,06 (H)^{3/4}$

H = tinggi total bangunan = 40,3 m

$$T_x = T_y = 0,06 (40,3)^{3/4} = 0,96 \text{ detik}$$

3. Koefisien gempa dasar (C)

Untuk mengetahui koefisien gempa dasar yang dihasilkan oleh waktu getar bangunan $T = 0,96 \text{ dt}$, dapat dicari pada tabel koefisien gempa

dasar yang disesuaikan dengan wilayah gempa dan kondisi tanah, yaitu jenis tanah lunak dan bangunan terletak di daerah gempa 2, diperoleh $C = 0,09$.

4. Faktor keutamaan (I) dan faktor jenis struktur (K)

Berdasarkan Pedoman Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Rumah dan Gedung 1987 diperoleh $I = 1,0$ dan $K = 1,0$ untuk bangunan perkantoran yang menggunakan struktur rangka beton bertulang dengan daktilitas penuh.

5. Gaya geser dasar horisontal total akibat gempa (V)

$$\begin{aligned} \text{Dengan rumus } V &= C \cdot I \cdot W_t \cdot K \\ &= 0,09 \cdot 1 \cdot 8144,816 \cdot 1 \\ &= 733,033 \text{ ton} \end{aligned}$$

6. Distribusi gaya geser dasar horisontal total akibat gempa ke sepanjang tinggi gedung (F_i)

$$\begin{aligned} \sim \text{arah } x &= H/A \\ &= 40,3/30 = 1,34 < 3 \end{aligned}$$

$$F_{ix} = \frac{(W_i \cdot h_i)_x}{\sum (W_i \cdot h_i)_x} \cdot V$$

$$\begin{aligned} \sim \text{arah } y &= H/B \\ &= 40,3/24 = 1,68 < 3 \end{aligned}$$

$$F_{iy} = \frac{(W_i \cdot h_i)_y}{\sum (W_i \cdot h_i)_y} \cdot V$$

Untuk mempermudah perhitungan, maka distribusi gaya geser horisontal disajikan dalam bentuk tabel berikut ini.

Tabel 4.1 Distribusi gaya geser dasar horisontal total akibat gempa

Tingkat (i)	h _i (m)	W _i (ton)	W _i h _i (tm)	F _i (ton)	Untuk tiap portal	
					1/4 F _{i,x} (ton)	1/6 F _{i,y} (ton)
1	7	876,908	6138,36	24,082	6,021	4,014
2	10,7	842,693	9016,82	35,384	8,846	5,897
3	14,4	842,693	12134,78	47,619	11,905	7,937
4	18,1	842,693	15252,74	59,855	14,964	9,976
5	21,8	842,693	18370,71	72,090	18,023	12,015
6	25,5	842,693	21488,67	84,326	21,108	14,054
7	29,2	842,693	24606,64	96,562	24,141	16,094
8	32,9	842,693	27724,60	108,797	27,199	18,133
9	36,6	842,693	30842,56	121,033	30,258	20,172
10	40,3	526,596	21221,82	83,279	20,820	13,880

$$\Sigma (W_i h_i) = 186797,70$$

7. Kontrol waktu getar dengan cara Rayleigh

Dengan melakukan analisis struktur, dapat dihitung besarnya simpangan (deformasi lateral total yang terjadi) akibat beban gempa di atas untuk portal arah x maupun arah y. Kekakuan dan simpangan setiap tingkat dapat diperoleh dengan persamaan

$$K_i = \frac{12 EI}{H_i^3}$$

dengan :

K_i = kekakuan lantai ke-i

E = modulus elastisitas

I = momen inersia

H_i = tinggi lantai ke-i

Sedang untuk defleksi relatif tiap-tiap tingkat dihitung dengan rumus

$$\delta_i = \frac{V_i}{K_i}$$

dengan :

V_i = gaya geser lantai ke-i

K_i = kekakuan lantai ke-i

Waktu getar yang sebenarnya untuk tiap arah dapat dihitung berdasarkan

rumus T. Rayleigh :

$$T_x = 2\pi \sqrt{\frac{\sum(W_i \cdot d_i x^2)}{g \sum(F_i x \cdot d_i x)}} \quad \text{untuk portal arah x}$$

$$T_y = 2\pi \sqrt{\frac{\sum(W_i \cdot d_i y^2)}{g \sum(F_i y \cdot d_i y)}} \quad \text{untuk portal arah y}$$

dengan :

W_i = berat lantai ke-i

F_i = gaya gempa lantai ke-i

d_i = deformasi lateral total akibat F_i yang terjadi pada lantai ke-i

g = percepatan gravitasi

a. Arah sumbu x

$$f_c = 30 \text{ Mpa}$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c}$$

$$= 4700 \sqrt{30} = 25742,96 \text{ Mpa}$$

$$1 \text{ Mpa} = 10,2 \text{ kg/cm}^2 = 102 \text{ ton/m}^2$$

$$E_c = 2625782 \text{ ton/m}^2$$

$$I = 1/12 \cdot 0,60 \cdot 0,60^3 = 0,0108 \text{ m}^4$$

$$K_1 = \frac{24 (12 EI)}{H_1^3}$$

$$= \frac{24 (12 \cdot 2625782 \cdot 0,0108)}{7^3} = 23811 \text{ t/m}$$

$$K_2 = \frac{24 (12 EI)}{H_2^3}$$

$$= \frac{24 (12 \cdot 2625782 \cdot 0,0108)}{3,7^3} = 161238 \text{ t/m}$$

$$K_2 = K_3 = K_4 = K_5 = K_6 = K_7 = K_8 = K_9 = K_{10}$$

Tabel 4.2 Simpangan lateral arah sumbu x

Tingkat (i)	F_i (ton)	Gaya geser (ton)	Kekakuan (t/m)	"Storey drift" δ_i (m)	Simpangan lateral d_i (m)
10	83,279	83,279	161238	0,000516	0,056076
9	121,033	204,312	161238	0,001267	0,055560
8	108,797	313,109	161238	0,001942	0,054293
7	96,562	409,671	161238	0,002541	0,052351
6	84,326	493,997	161238	0,003064	0,049810
5	72,090	565,087	161238	0,003505	0,046746
4	59,855	625,942	161238	0,003882	0,043241
3	47,619	673,561	161238	0,004177	0,039359
2	35,384	708,945	161238	0,004397	0,035182
1	24,082	733,027	23811	0,030785	0,030785

Tabel 4.3 Hitungan persamaan Rayleigh arah sumbu x

Tingkat (i)	W_i (ton)	Simpangan lateral d_i (m)	$W_i \cdot d_i^2$ (tm^2)	F_i (ton)	$F_i \cdot d_i$ (tm)
10	526,596	0,056076	1,656	83,279	4,670
9	842,693	0,055560	2,601	121,033	6,725
8	842,693	0,054293	2,484	108,797	5,907
7	842,693	0,052351	2,310	96,562	5,055
6	842,693	0,049810	2,091	84,326	4,200
5	842,693	0,046746	1,841	72,090	3,370
4	842,693	0,043241	1,576	59,855	2,588
3	842,693	0,039359	1,305	47,619	1,874
2	842,693	0,035182	1,043	35,384	1,245
1	876,908	0,030785	0,799	24,082	0,741

$$\Sigma (W_i \cdot d_i^2) = 17,706$$

$$\Sigma (F_i \cdot d_i) = 36,375$$

$$\begin{aligned} \text{Waktu getar struktur } T_x &= 2\pi \sqrt{\frac{\Sigma (W_i \cdot d_i^2)}{g \Sigma (F_i \cdot d_i)}} \\ &= 2\pi \sqrt{\frac{17,706}{9,81 \cdot 36,375}} \\ &= 1,40 \text{ detik} > 0,95 \text{ detik} \dots \dots \text{ok} \end{aligned}$$

b. Arah sumbu y

$$E_c = 2625782 \text{ t/m}^2$$

$$I = 1/12 \cdot 0,60 \cdot 0,60^3 = 0,0108 \text{ m}^4$$

$$K_1 = \frac{4(12EI)}{H_1^3} = \frac{4(12 \cdot 2625782 \cdot 0,0108)}{7^3} = 3969 \text{ t/m}$$

$$K_2 = \frac{4(12EI)}{H_2^3} = \frac{4(12 \cdot 2625782 \cdot 0,0108)}{3,7^3} = 26873 \text{ t/m}$$

$$K_2 = K_3 = K_4 = K_5 = K_6 = K_7 = K_8 = K_9 = K_{10}$$

Tabel 4.4 Simpangan lateral arah sumbu y

Tingkat (i)	F_i (ton)	Gaya geser (ton)	Kekakuan (t/m)	"Storey drift" δ_i (m)	Simpangan lateral d_i (m)
10	13,880	13,880	26873	0,000517	0,056080
9	20,172	34,052	26873	0,001267	0,055563
8	18,133	52,185	26873	0,001942	0,054296
7	16,094	68,279	26873	0,002541	0,052354
6	14,054	82,333	26873	0,003064	0,049813
5	12,015	94,348	26873	0,003511	0,046749
4	9,976	104,324	26873	0,003882	0,043238
3	7,937	112,261	26873	0,004177	0,039356
2	5,897	118,158	26873	0,004397	0,035179
1	4,014	122,172	3969	0,030782	0,030782

Tabel 4.5 Hitungan persamaan Rayleigh arah sumbu y

Tingkat (i)	W_i (ton)	Simpangan lateral d_i (m)	$W_i \cdot d_i^2$ (tm^2)	F_i (ton)	$F_i \cdot d_i$ (tm)
10	87,766	0,056080	0,276	13,880	0,778
9	140,449	0,055563	0,434	20,172	1,121
8	140,449	0,054296	0,414	18,133	0,985
7	140,449	0,052354	0,385	16,094	0,843
6	140,449	0,049813	0,349	14,054	0,700
5	140,449	0,046749	0,307	12,015	0,562
4	140,449	0,043238	0,263	9,976	0,431
3	140,449	0,039356	0,218	7,937	0,312
2	140,449	0,035179	0,174	5,897	0,207
1	146,151	0,030782	0,138	4,014	0,124

$$\Sigma (W_i \cdot d_i^2) = 2,958$$

$$\Sigma (F_i \cdot d_i) = 6,063$$



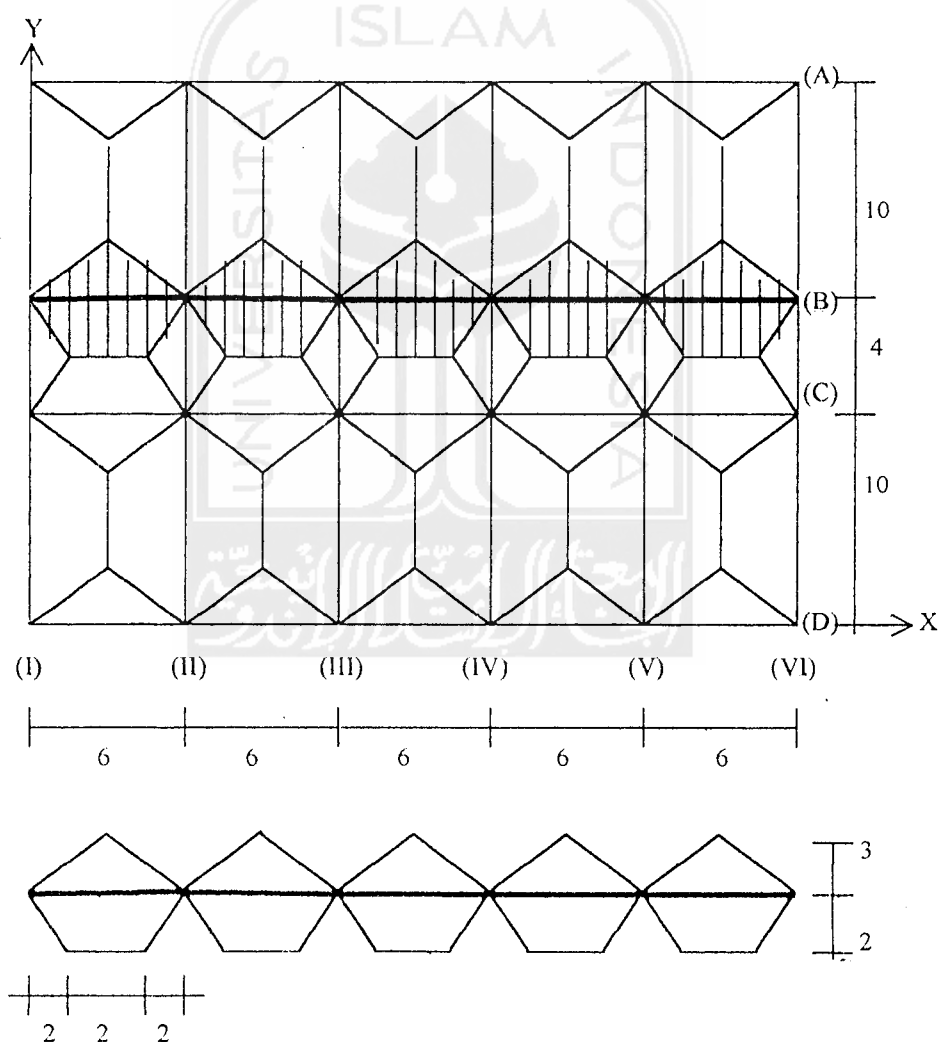
Waktu getar struktur

$$T_y = 2\pi \sqrt{\frac{\sum (W_i \cdot d_i^2)}{g \sum (F_i \cdot d_i)}}$$

$$= 2\pi \sqrt{\frac{2,958}{9,81 \cdot 6,063}} = 1,40 \text{ detik} > 0,95 \text{ detik} \dots\dots \text{ok}$$

4.2.2 Perhitungan Beban Akibat Gaya Gravitasi

1. Beban merata ekuivalen untuk portal arah x (portal B)



Gambar 4.4 Distribusi beban plat metode amplop arah sumbu x

Persamaan beban merata ekuivalen untuk distribusi beban plat berbentuk segitiga adalah,

$$q_{eq} = 1/3 \cdot q_{pl} \cdot lx$$

Sedang untuk bentuk trapesium adalah,

$$q_{eq} = 1/6 \cdot lx [3 - (lx/ly)^2] q_{pl}$$

dengan q_{eq} = beban merata ekuivalen

q_{pl} = beban merata plat

lx = bentang yang lebih pendek dari panel plat yang ditinjau

ly = bentang yang lebih panjang dari panel plat yang ditinjau

a. Lantai 10 (atap)

1. Beban merata plat/m² akibat beban mati

$$\text{- plat atap} = 0,12 \cdot 2,4 = 0,312 \text{ t/m}^2$$

$$\text{- plafon} = 0,011 + 0,007 = 0,018 \text{ t/m}^2$$

$$\text{- air hujan} = 0,02 \cdot 1,0 = 0,020 \text{ t/m}^2$$

$$q_{pl} = 0,350 \text{ t/m}^2$$

Beban merata ekuivalen bentuk segitiga

$$q_{eq} = 1/3 \cdot q_{pl} \cdot lx$$

$$= 1/3 \cdot 0,350 \cdot 6 = 0,700 \text{ t/m}^2$$

Beban merata ekuivalen bentuk trapesium

$$q_{eq} = 1/6 \cdot lx [3 - (lx/ly)^2] q_{pl}$$

$$= 1/6 \cdot 4 [3 - (4/6)^2] 0,350 = 0,596 \text{ t/m}^2$$

Berat sendiri balok

$$q_{bl} = 0,30 \cdot 0,48 \cdot 2,4 = 0,347 \text{ t/m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Maka } q_{\text{eq}} \text{ total} &= 0,700 + 0,596 + 0,347 \\ &= 1,643 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

2. Beban merata plat/m² akibat beban hidup

$$q_h \text{ atap} = 100 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{koefisien reduksi} = 0,6$$

$$q_{\text{pl}} = 0,6 \cdot 0,10 = 0,06 \text{ t/m}^2$$

Beban merata ekuivalen bentuk segitiga

$$q_{\text{eq}} = 1/3 \cdot 0,06 \cdot 6 = 0,120 \text{ t/m}^2$$

Beban merata ekuivalen bentuk trapesium

$$q_{\text{eq}} = 1/6 \cdot 4 \cdot [3 - (4/6)^2] \cdot 0,06 = 0,102 \text{ t/m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Maka } q_{\text{eq}} \text{ total} &= 0,120 + 0,102 \\ &= 0,222 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

b. Lantai 9 - lantai 1

1. Beban merata plat/m² akibat beban mati

$$\text{- plat lantai} = 0,13 \cdot 2,4 = 0,312 \text{ t/m}^2$$

$$\text{- plafon} = 0,011 + 0,007 = 0,018 \text{ t/m}^2$$

$$\text{- pasir} = 0,05 \cdot 1,6 = 0,080 \text{ t/m}^2$$

$$\text{- spesi} = 0,02 \cdot 2,1 = 0,042 \text{ t/m}^2$$

$$\text{- tegel} = 0,02 \cdot 2,4 = 0,048 \text{ t/m}^2$$

$$q_{\text{pl}} = 0,500 \text{ t/m}^2$$

Beban merata bentuk segitiga

$$q_{\text{eq}} = 1/3 \cdot 0,500 \cdot 6 = 1,00 \text{ t/m}^2$$

Beban merata trapesium

$$q_{eq} = 1/6 \cdot 4 [3 - (4/6)^2] 0,500 = 0,852 \text{ t/m'}$$

Berat sendiri balok

$$q_{bl} = 0,30 \cdot 0,47 \cdot 2,4 = 0,338 \text{ t/m'}$$

Berat dinding

$$q_{din} = 3,1 \cdot 0,250 = 0,775 \text{ t/m'}$$

$$\begin{aligned} \text{Maka } q_{eq} \text{ total} &= 1,00 + 0,852 + 0,338 + 0,775 \\ &= 2,965 \text{ t/m'} \end{aligned}$$

2. Beban merata plat/m' akibat beban hidup

$$q_h \text{ lantai} = 250 \text{ t/m}^2$$

$$\text{koefisien reduksi} = 0,6$$

$$q_{pl} = 0,6 \cdot 0,25 = 0,15 \text{ t/m'}$$

Beban merata ekivalen bentuk segitiga

$$q_{eq} = 1/3 \cdot 6 \cdot 0,15 = 0,30 \text{ t/m'}$$

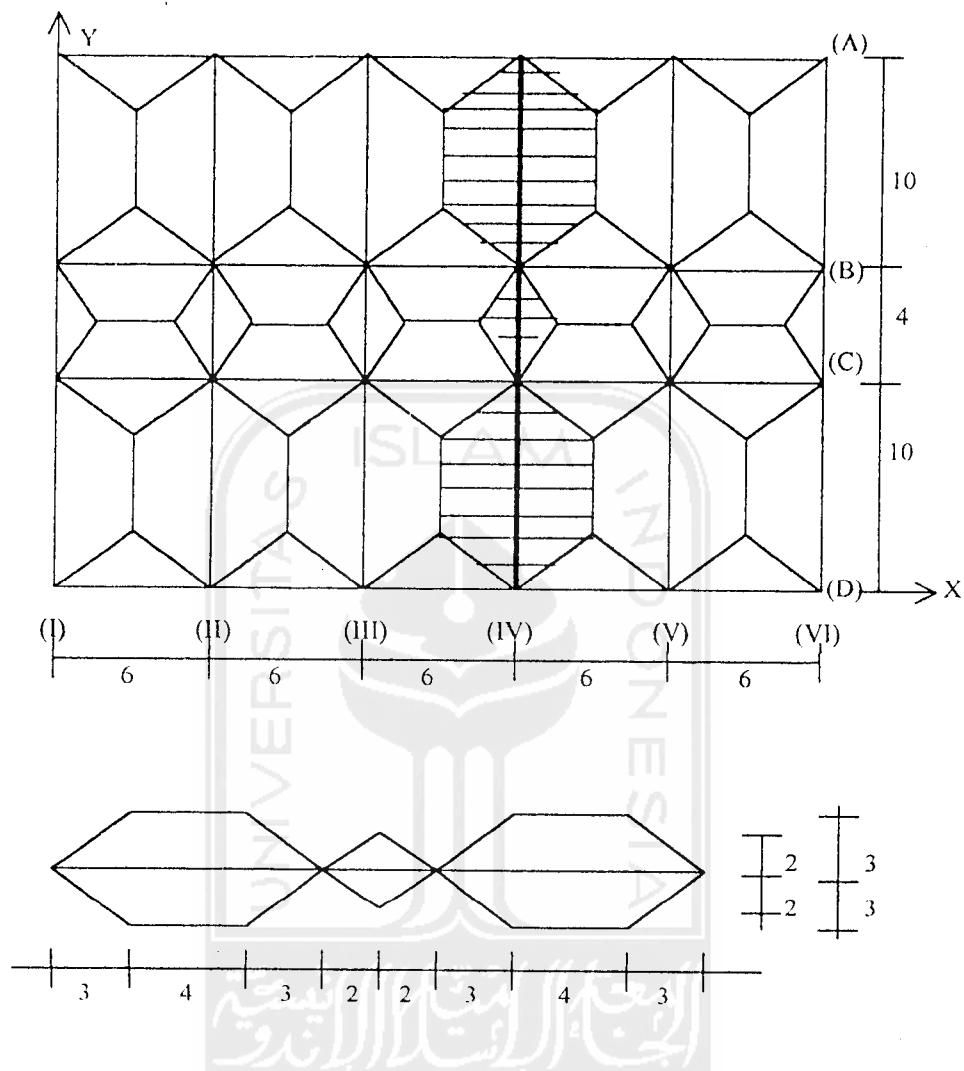
Beban merata ekivalen bentuk trapesium

$$q_{eq} = 1/6 \cdot 4 [3 - (4/6)^2] 0,15 = 0,23 \text{ t/m'}$$

$$\text{Maka } q_{eq} \text{ total} = 0,30 + 0,23$$

$$= 0,530 \text{ t/m'}$$

2. Beban merata ekivalen untuk portal arah y (portal IV)



Gambar 4.5 Distribusi beban plat metode amplop arah sumbu y

a. Lantai 10 (atap)

1. Beban merata plat/m' akibat beban mati

$$\text{- plat atap} = 0,12 \cdot 2,4 = 0,288 \text{ t/m}^2$$

$$\text{- plafon} = 0,011 + 0,007 = 0,018 \text{ t/m}^2$$

$$\text{- air hujan} = 0,02 \cdot 1,0 = 0,020 \text{ t/m}^2$$

$$q_{pl} = 0,326 \text{ t/m}^2$$

~ Balok AB = Balok CD

beban merata trapesium

$$q_{eq} = 2 \cdot \frac{1}{6} \cdot 6 [3 - (6/10)^2] 0,326 = 1,721 \text{ t/m}^2$$

berat sendiri balok

$$q_{bl} = 0,35 \cdot 0,63 \cdot 2,4 = 0,529 \text{ t/m}^2$$

$$\text{maka } q_{eq} \text{ total} = 1,721 + 0,529$$

$$= 2,250 \text{ t/m}^2$$

~ Balok BC

beban merata segitiga

$$q_{eq} = 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot 0,326 \cdot 4 = 0,869 \text{ t/m}^2$$

berat sendiri balok

$$q_{bl} = 0,30 \cdot 0,28 \cdot 2,4 = 0,202 \text{ t/m}^2$$

$$\text{maka } q_{eq} \text{ total} = 0,869 + 0,202$$

$$= 1,071 \text{ t/m}^2$$

2. Beban merata plat/m² akibat beban hidup

$$q_h \text{ atap} = 100 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{koefisien reduksi} = 0,6$$

$$q_{pl} = 0,6 \cdot 0,10 = 0,06 \text{ t/m}^2$$

~ Balok AB = balok CD

beban merata trapesium

$$q_{eq} = 2 \cdot \frac{1}{6} \cdot 6 [3 - (6/10)^2] 0,06 = 0,317 \text{ t/m}^2$$

~ Balok BC

beban merata segitiga

$$q_{eq} = 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot 0,06 \cdot 4 = 0,160 \text{ t/m}^2$$

b. Lantai 9 – lantai 1

1. Beban merata plat/m² akibat beban mati

$$\text{- plat lantai} = 0,13 \cdot 2,4 = 0,312 \text{ t/m}^2$$

$$\text{- plafon} = 0,011 + 0,007 = 0,018 \text{ t/m}^2$$

$$\text{- pasir} = 0,05 \cdot 1,6 = 0,080 \text{ t/m}^2$$

$$\text{- spesi} = 0,02 \cdot 2,1 = 0,042 \text{ t/m}^2$$

$$\text{- tegel} = 0,02 \cdot 2,4 = 0,048 \text{ t/m}^2$$

$$q_{pl} = 0,500 \text{ t/m}^2$$

~ Balok AB = balok CD

beban merata trapesium

$$q_{eq} = 2 \cdot \frac{1}{6} \cdot 6 \left[3 + \left(\frac{6}{10} \right)^2 \right] 0,500 = 2,64 \text{ t/m}^2$$

berat sendiri balok

$$q_{bl} = 0,35 \cdot 0,62 \cdot 2,4 = 0,521 \text{ t/m}^2$$

berat dinding

$$q_{din} = 2,95 \cdot 0,25 = 0,738 \text{ t/m}^2$$

$$\text{maka } q_{eq} \text{ total} = 2,264 + 0,521 + 0,738$$

$$3,523 \text{ t/m}^2$$

~ Balok BC

beban merata segitiga

$$q_{eq} = 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot 0,500 \cdot 4 = 1,333 \text{ t/m}^2$$

berat sendiri balok

$$q_{bl} = 0,30 \cdot 0,27 \cdot 2,4 = 0,194 \text{ t/m}$$

berat dinding

$$q_{din} = 3,3 \cdot 0,25 = 0,825 \text{ t/m}$$

$$\text{maka } q_{eq} \text{ total} = 1,333 + 0,194 + 0,825$$

$$= 2,352 \text{ t/m}$$

2. Beban merata plat/m' akibat beban hidup

$$q \text{ hidup lantai} = 250 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{koefisien reduksi} = 0,6$$

$$q_{pl} = 0,6 \cdot 0,25 = 0,15 \text{ t/m}^2$$

~ Balok AB = balok CD

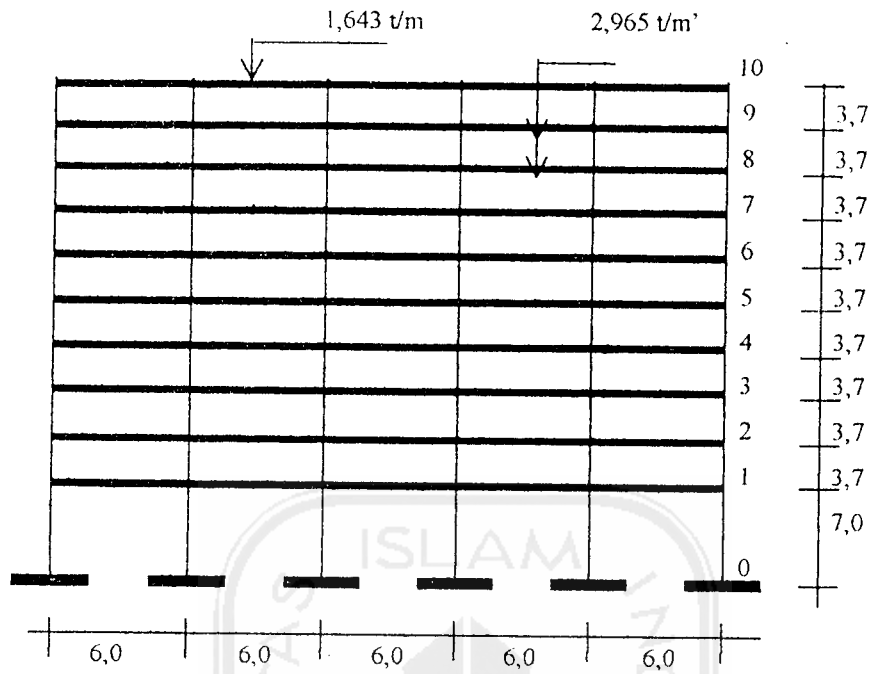
beban merata trapesium

$$q_{eq} = 2 \cdot 1/6 \cdot 6 [3 - (6/10)^2] 0,15 = 0,792 \text{ t/m}$$

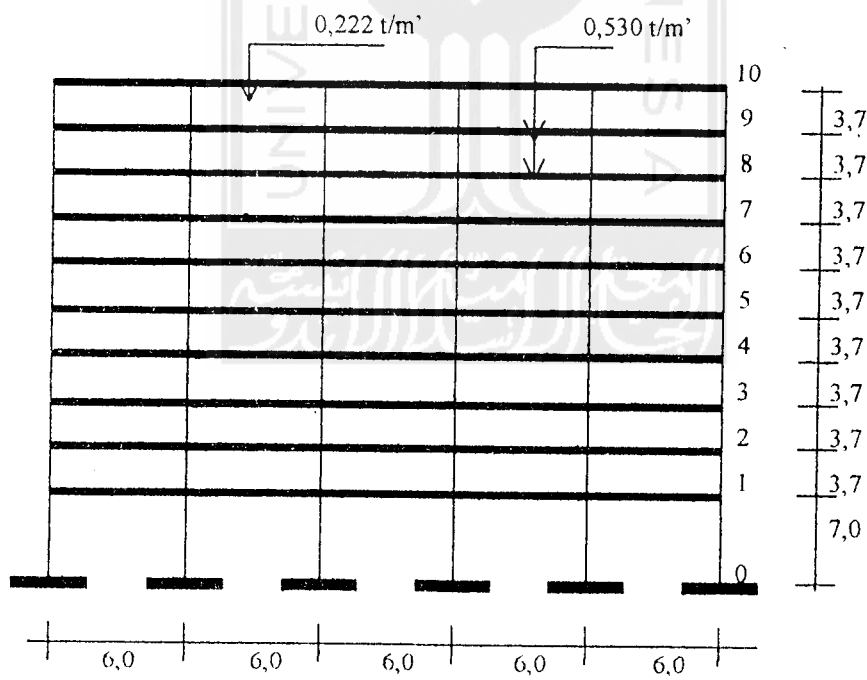
~ Balok BC

beban merata segitiga

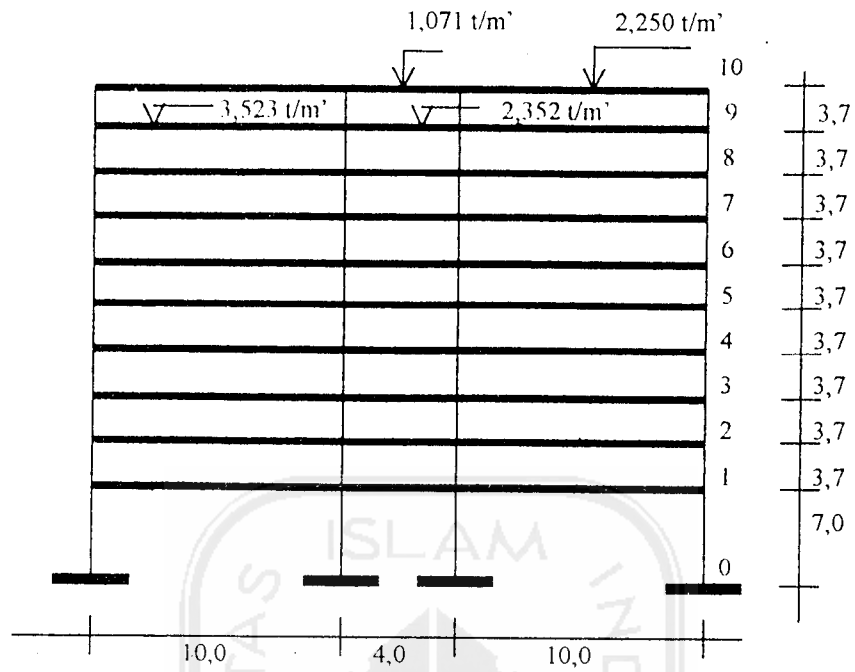
$$q_{eq} = 2 \cdot 1/3 \cdot 0,15 \cdot 4 = 0,400 \text{ t/m}$$



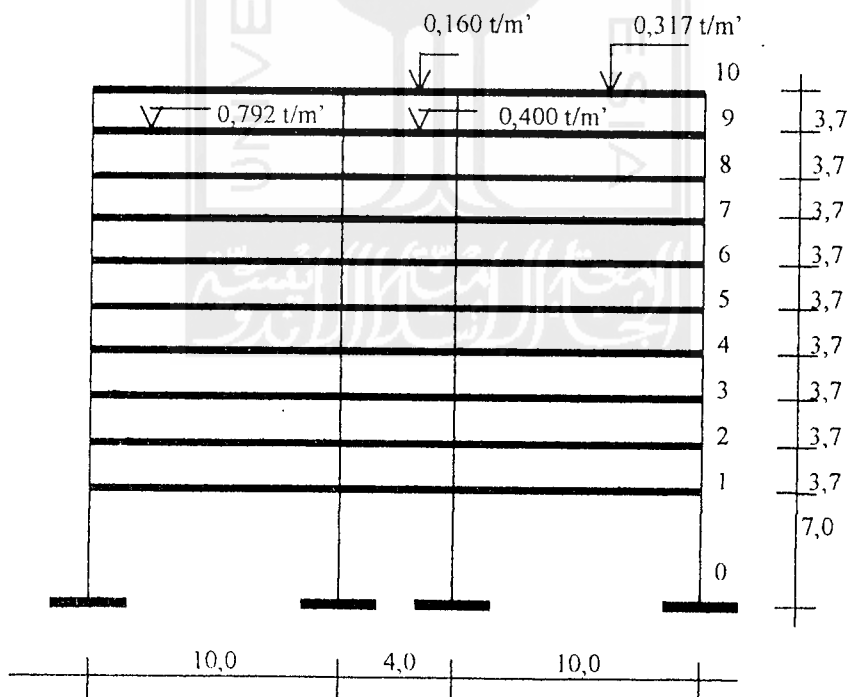
Gambar 4.6 Beban mati arah sumbu x (portal B)



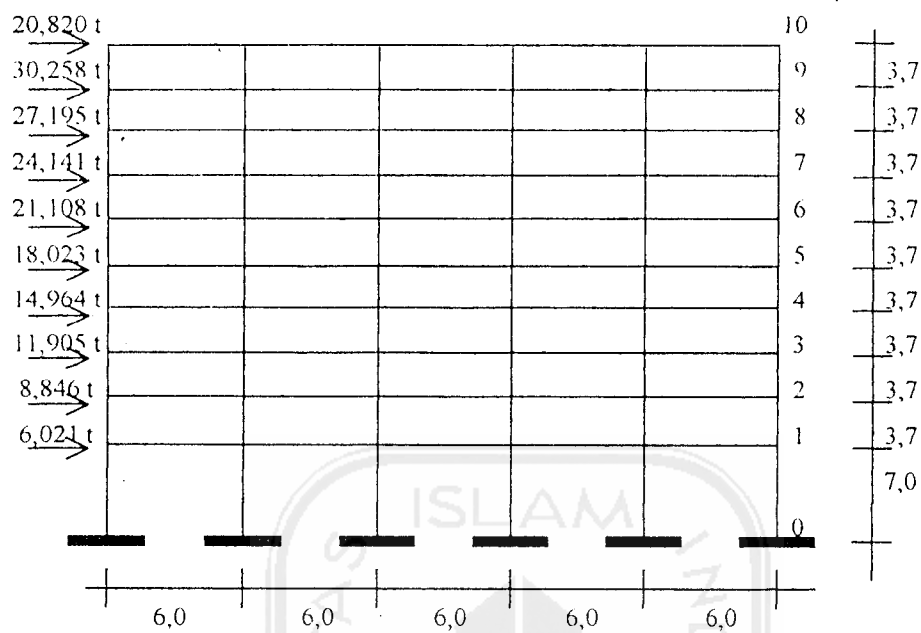
Gambar 4.7 Beban hidup arah sumbu x (portal B)



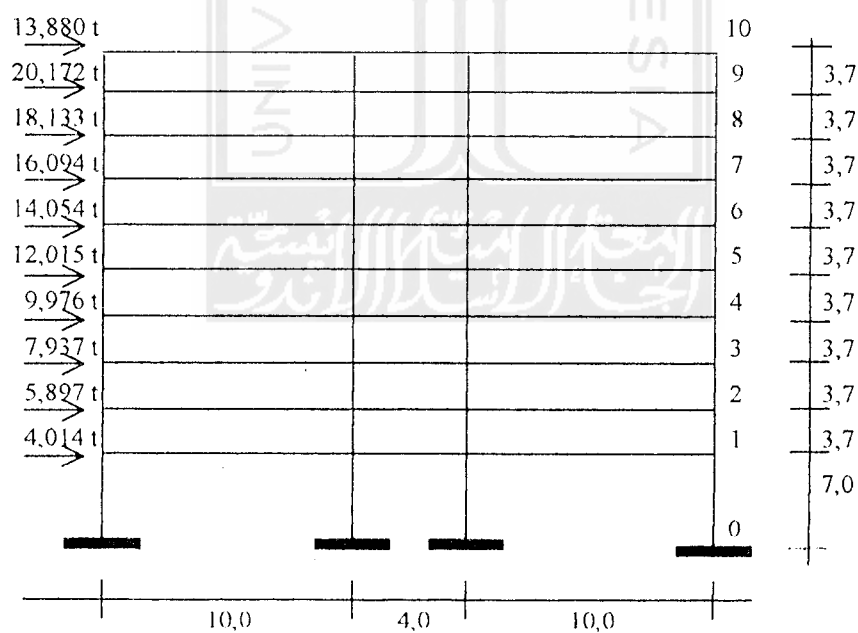
Gambar 4.8 Beban mati arah sumbu y (portal IV)



Gambar 4.9 Beban hidup arah sumbu y (portal IV)

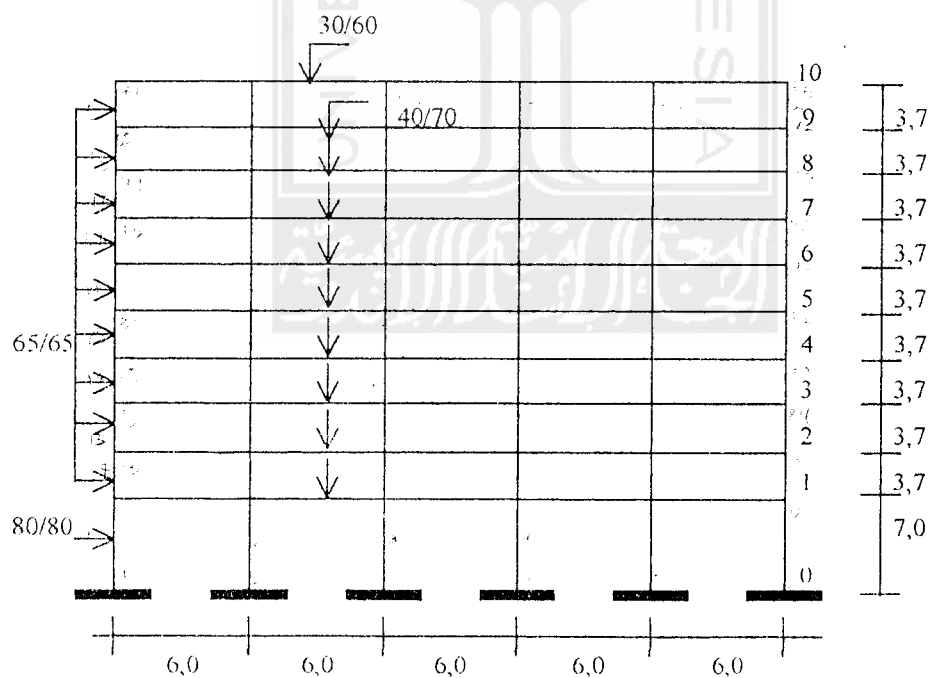


Gambar 4.10 Beban lateral arah sumbu x

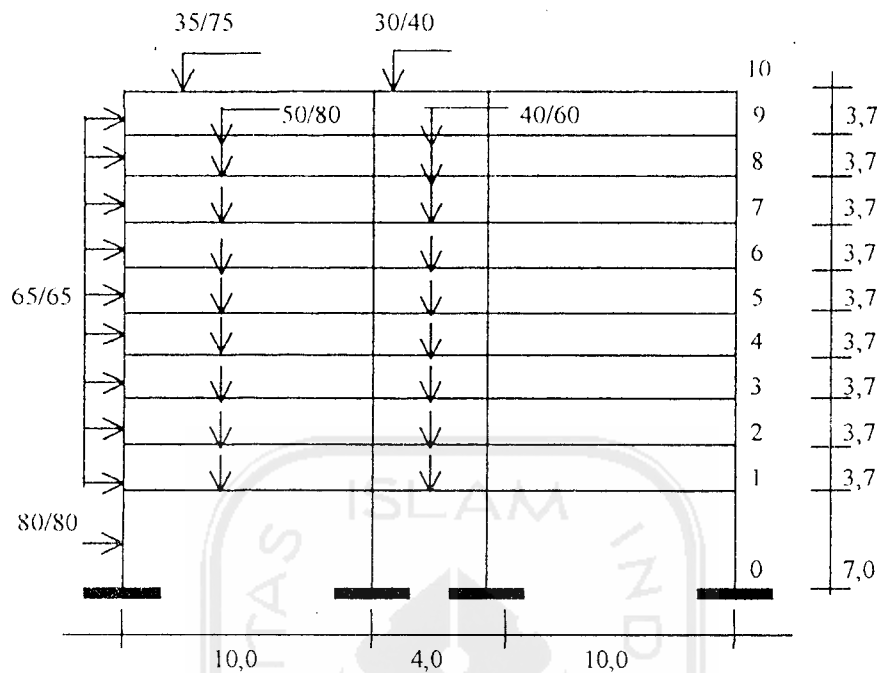


Gambar 4.11 Beban lateral arah sumbu y

Setelah pembebanan yang terdapat pada gambar 4.6 sampai 4.11 dihitung dengan menggunakan kombinasi pembebanan tertentu dengan bantuan program komputer SAP, gaya-gaya yang bekerja relatif besar, sehingga dengan asumsi dimensi yang terdapat pada gambar 4.1 dan 4.2 tidak cukup untuk menahan gaya yang bekerja, maka dimensi elemen portal diperbesar tanpa harus menghitung ulang besar beban yang bekerja setelah pembesaran dimensi batang termasuk perhitungan analisis struktur. Sebab penambahan berat tersebut diperkirakan kurang dari 5% dari berat total bangunan sebelum perubahan dimensi. Sementara itu, dengan pembesaran dimensi maka kekakuan elemen akan bertambah jauh lebih besar dibandingkan dengan kekakuan sebelum pembesaran. Perubahan dimensi elemen portal adalah sebagai berikut ini.



Gambar 4.12 Dimensi portal arah sumbu x yang direvisi



Gambar 4.13 Dimensi portal arah sumbu y yang direvisi

4.3 Analisis Efek P-Delta pada Perancangan Kolom

4.3.1 Iterasi Efek P-Delta

Langkah pertama yaitu dengan melakukan analisis linear struktur pada portal dengan dimensi yang telah direvisi dan dengan pembebanan seperti gambar di atas untuk masing-masing arah. Analisis linear yang dipakai adalah metode matrik kekakuan atau elemen hingga yaitu paket program komputer SAP. Adapun langkah selanjutnya dipakai metode dengan memodifikasi gaya-gaya dalam hasil analisis linear seperti yang telah diuraikan pada bab di muka. Kolom yang akan dianalisis adalah kolom luar (“exterior coloum”) dari masing-masing portal arah x maupun y dan hasil dari setiap langkah disajikan dalam bentuk tabel sebagai berikut ini.

Tabel 4.6 Hasil analisis efek P-Delta dengan iterasi arah sumbu x

Iterasi ke	Lantai ke-i	Gaya Lateral H_i (ton)	Defleksi Lateral Δ_i (m)	Gaya Aksial total Lantai ke-i ΣP_i (ton)	Pertambahan Gaya Lintang Lantai ke-i V_i' (ton)	Pertambahan Gaya Lateral Lantai ke-i H_i' (ton)	$H_i + H_i'$
0	10	20,820	0,095054	333,56	-	0,274	21,094
	9	30,258	0,092019	892,46	0,274	0,716	30,974
	8	27,199	0,087916	1451,35	0,990	1,302	28,501
	7	24,141	0,082074	2010,23	2,292	1,771	25,912
	6	21,108	0,074596	2569,12	4,063	2,116	23,224
	5	18,023	0,065697	3128,01	6,179	2,360	20,383
	4	14,964	0,055597	3686,90	8,539	2,508	17,472
	3	11,905	0,044511	4245,77	11,047	2,637	14,542
	2	8,846	0,032586	4804,67	13,684	3,304	12,150
	1	6,021	0,019504	5573,56	16,988	-1,458	4,563
	0	-	0	-	15,530	-	-
1	10		0,101398	333,56	-	0,279	21,099
	9		0,098304	892,46	0,279	0,735	30,993
	8		0,094101	1451,35	1,014	1,351	28,550
	7		0,088071	2010,23	2,365	1,865	26,006
	6		0,080286	2569,12	4,230	2,263	23,371
	5		0,070935	3128,01	6,493	2,562	20,585
	4		0,060224	3686,90	9,055	2,769	17,733
	3		0,048358	4245,77	11,824	2,967	14,872
	2		0,035468	4804,67	14,791	3,764	12,610
	1		0,021179	5573,56	18,555	-1,692	4,329
	0		0	-	16,863	-	-

Iterasi ke	Lantai ke-i	Gaya Lateral H_i (ton)	Defleksi Lateral Δ_i (m)	Gaya Aksial total Lantai ke-i ΣP_i (ton)	Pertambahan Gaya Lintang Lantai ke-i V_i' (ton)	Pertambahan Gaya Lateral Lantai ke-i H_i' (ton)	$H_i + H_i'$
2	10		0,101873	333,56	-	0,279	21,099
	9		0,098777	892,46	0,279	0,736	30,994
	8		0,094570	1451,35	1,015	1,353	28,552
	7		0,088533	2010,23	2,368	1,869	26,010
	6		0,080735	2569,12	4,237	2,273	23,381
	5		0,071360	3128,01	6,510	2,577	20,600
	4		0,060611	3686,90	9,087	2,792	17,756
	3		0,048690	4245,77	11,879	3,002	14,907
	2		0,035722	4804,67	14,881	3,816	12,662
	1		0,021324	5573,56	18,697	-1,718	4,303
	0		0	-	16,979	-	-
3	10		0,101911	333,56	-	0,279	21,099
	9		0,098815	892,46	0,279	0,736	30,994
	8		0,094608	1451,35	1,015	1,353	28,552
	7		0,088570	2010,23	2,368	1,869	26,010
	6		0,080771	2569,12	4,237	2,273	23,381
	5		0,071395	3128,01	6,510	2,579	20,602
	4		0,060644	3686,90	9,089	2,794	17,758
	3		0,048719	4245,77	11,883	3,006	14,911
	2		0,035744	4804,67	14,889	3,821	12,667
	1		0,021336	5573,56	18,710	-1,722	4,299
	0		0	-	16,988	-	-

Iterasi ke	Lantai ke-i	Gaya Lateral H_i (ton)	Defleksi Lateral Δ_i (m)	Gaya Aksial total Lantai ke-i ΣP_i (ton)	Pertambahan Gaya Lintang Lantai ke-i V_i' (ton)	Pertambahan Gaya Lateral Lantai ke-i H_i' (ton)	$H_i + H_i'$
4	10		0,101913	333,56	-	0,279	21,099
	9		0,098818	892,46	0,279	0,736	30,994
	8		0,094611	1451,35	1,015	1,353	28,552
	7		0,088573	2010,23	2,368	1,869	26,010
	6		0,080774	2569,12	4,237	2,273	23,381
	5		0,071398	3128,01	6,510	2,580	20,603
	4		0,060646	3686,90	9,090	2,793	17,757
	3		0,048721	4245,77	11,883	3,006	14,911
	2		0,035746	4804,67	14,889	3,822	12,668
	1		0,021337	5573,56	18,711	-1,722	4,299
	0		0	-	16,989	-	-
5	10		0,101914	333,56	-	0,279	21,099
	9		0,098818	892,46	0,279	0,736	30,994
	8		0,094611	1451,35	1,015	1,353	28,552
	7		0,088574	2010,23	2,368	1,870	26,011
	6		0,080774	2569,12	4,238	2,272	23,380
	5		0,071398	3128,01	6,510	2,579	20,602
	4		0,060647	3686,90	9,089	2,795	17,759
	3		0,048721	4245,77	11,884	3,005	14,910
	2		0,035746	4804,67	14,889	3,821	12,667
	1		0,021338	5573,56	18,710	-1,720	4,297
	0		0	-	16,990	-	-

Tabel 4.7 Hasil analisis efek P-Delta dengan iterasi arah sumbu y

Iterasi ke	Lantai ke-i	Gaya Lateral H_i (ton)	Defleksi Lateral Δ_i (m)	Gaya Aksial total Lantai ke-i ΣP_i (ton)	Pertambahan Gaya Lintang Lantai ke-i V_i' (ton)	Pertambahan Gaya Lateral Lantai ke-i H_i' (ton)	$H_i + H_i'$
0	10	13,880	0,097581	282,85	-	0,245	14,125
	9	20,172	0,094374	771,72	0,245	0,632	20,804
	8	18,133	0,090170	1260,57	0,877	1,182	19,315
	7	16,094	0,084127	1749,44	2,059	1,590	17,684
	6	14,054	0,076410	2238,31	3,649	1,900	15,954
	5	12,015	0,067237	2727,15	5,549	2,117	14,132
	4	9,976	0,056837	3216,02	7,666	2,248	12,224
	3	7,937	0,045431	3704,88	9,914	2,352	10,289
	2	5,897	0,033181	4193,73	12,266	3,003	8,900
	1	4,014	0,019710	4822,60	15,269	-1,690	2,324
	0	-	0	-	13,579	-	-
1	10		0,106573	282,85	-	0,252	14,132
	9		0,103281	771,72	0,252	0,656	20,828
	8		0,098929	1260,57	0,908	1,243	19,376
	7		0,092614	1749,44	2,151	1,628	17,722
	6		0,084622	2238,31	3,779	2,250	16,304
	5		0,074656	2727,15	6,029	2,266	14,281
	4		0,063402	3216,02	8,295	2,565	12,541
	3		0,050908	3704,88	10,860	2,759	10,696
	2		0,037307	4193,73	13,619	3,593	9,490
	1		0,022121	4822,60	17,212	-1,972	2,042
	0		0	-	15,240	-	-

Iterasi ke	Lantai ke-i	Gaya Lateral H_i (ton)	Defleksi Lateral Δ_i (m)	Gaya Aksial total Lantai ke-i ΣP_i (ton)	Pertambahan Gaya Lintang Lantai ke-i V_i' (ton)	Pertambahan Gaya Lateral Lantai ke-i H_i' (ton)	$H_i + H_i'$
2	10		0,107200	282,85	-	0,252	14,132
	9		0,103904	771,72	0,252	0,657	20,829
	8		0,099544	1260,57	0,909	1,251	19,384
	7		0,093216	1749,44	2,160	1,705	17,799
	6		0,085041	2238,31	3,865	2,098	16,152
	5		0,075184	2727,15	5,963	2,385	14,400
	4		0,063858	3216,02	8,348	2,601	12,577
	3		0,051261	3704,88	10,949	2,800	10,737
	2		0,037530	4193,73	13,749	3,582	9,479
	1		0,022239	4822,60	17,331	-2,010	2,004
	0		0	-	15,321	-	-
3	10		0,107260	282,85	-	0,252	14,132
	9		0,103964	771,72	0,252	0,658	20,830
	8		0,099603	1260,57	0,910	1,247	19,380
	7		0,093273	1749,44	2,157	1,711	17,805
	6		0,085092	2238,31	3,868	2,093	16,147
	5		0,075238	2727,15	5,961	2,391	14,406
	4		0,063907	3216,02	8,352	2,605	12,581
	3		0,051301	3704,88	10,957	2,805	10,742
	2		0,037557	4193,73	13,762	3,584	9,481
	1		0,022253	4822,60	17,346	-2,015	1,999
	0		0	-	15,331	-	-

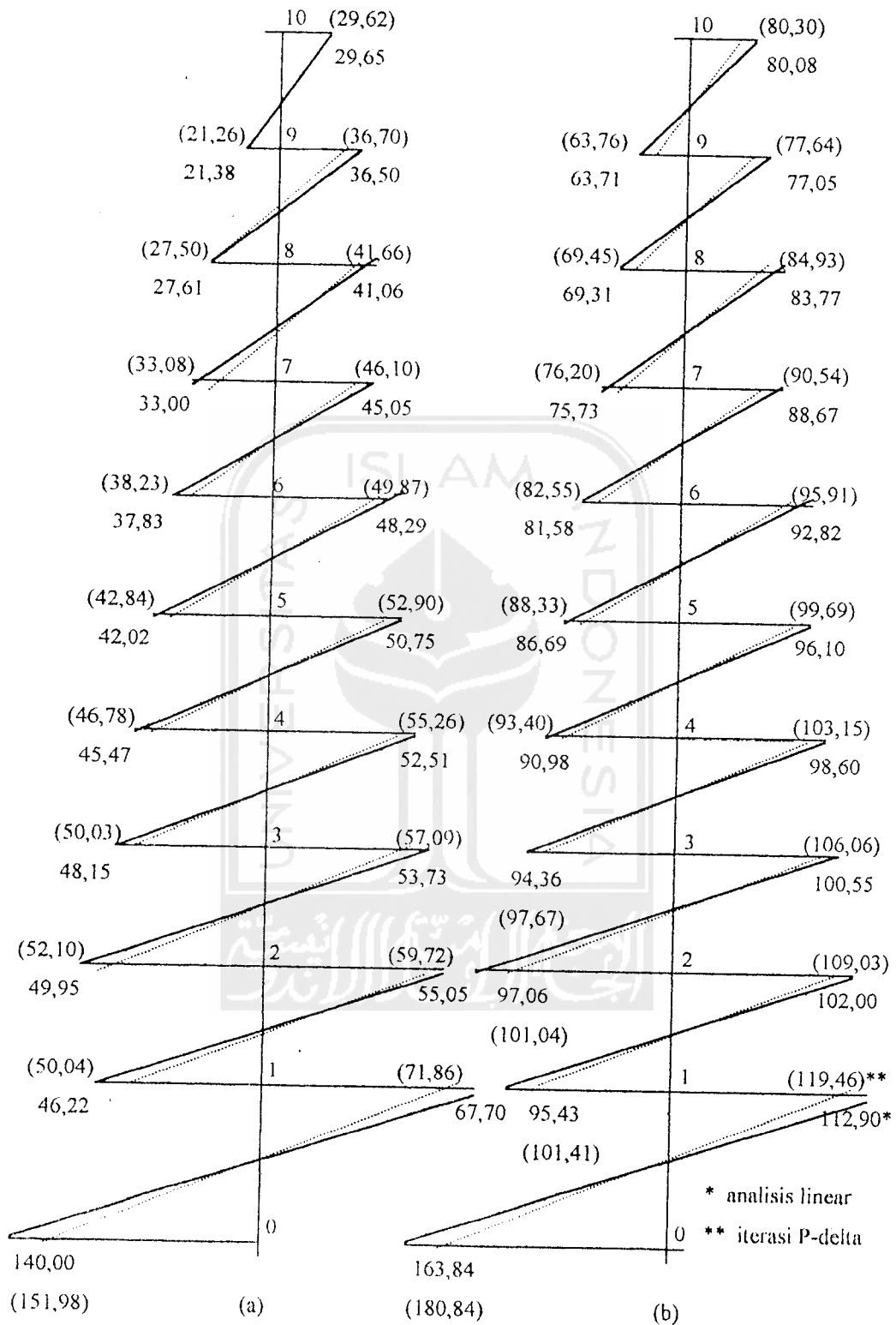
Iterasi ke	Lantai ke-i	Gaya Lateral H_i (ton)	Defleksi Lateral Δ_i (m)	Gaya Aksial total Lantai ke-i ΣP_i (ton)	Pertambahan Gaya Lintang Lantai ke-i V_i' (ton)	Pertambahan Gaya Lateral Lantai ke-i H_i' (ton)	$H_i + H_i'$
4	10		0,107266	282,85	-	0,252	14,132
	9		0,103970	771,72	0,252	0,658	20,830
	8		0,099609	1260,57	0,910	1,247	19,380
	7		0,093279	1749,44	2,157	1,711	17,805
	6		0,085098	2238,31	3,868	2,093	16,147
	5		0,075244	2727,15	5,961	2,391	14,406
	4		0,063912	3216,02	8,352	2,605	12,581
	3		0,051306	3704,88	10,957	2,807	10,744
	2		0,037560	4193,73	13,764	3,583	9,480
	1		0,022255	4822,60	17,347	-2,014	1,999
	0		0	-	15,332	-	-
5	10		0,107267	282,85	-	0,252	14,132
	9		0,103970	771,72	0,252	0,658	20,830
	8		0,099610	1260,57	0,910	1,247	19,380
	7		0,093280	1749,44	2,157	1,711	17,805
	6		0,085099	2238,31	3,868	2,094	16,148
	5		0,075244	2727,15	5,962	2,390	14,405
	4		0,063913	3216,02	8,352	2,606	12,582
	3		0,051306	3704,88	10,958	2,806	10,743
	2		0,037560	4193,73	13,764	3,583	9,480
	1		0,022255	4822,60	17,347	-2,014	1,999
	0		0	-	15,332	-	-

Tabel 4.8 Gaya lateral dan defleksi lateral arah sumbu x

Lantai ke-i	Gaya lateral awal H_i (ton)	Defleksi lateral awal Δ_i (m)	Gaya lateral akhir H_i^* (ton)	Defleksi lateral akhir Δ_i^* (m)
10	20,820	0,095054	21,099	0,101914
9	30,258	0,092019	30,994	0,098818
8	27,199	0,087916	28,552	0,094611
7	24,141	0,082074	26,011	0,088574
6	21,108	0,074596	23,380	0,080774
5	18,023	0,065697	20,602	0,071398
4	14,964	0,055597	17,759	0,060647
3	11,905	0,044511	14,910	0,048721
2	8,846	0,032586	12,667	0,035746
1	6,021	0,019504	4,297	0,021338
0	-	0	-	0

Tabel 4.9 Gaya lateral dan defleksi lateral arah sumbu y

Lantai ke-i	Gaya lateral awal H_i (ton)	Defleksi lateral awal Δ_i (m)	Gaya lateral akhir H_i^* (ton)	Defleksi lateral akhir Δ_i^* (m)
10	13,880	0,097581	14,132	0,107267
9	20,172	0,094374	20,830	0,103970
8	18,133	0,090170	19,380	0,099610
7	16,094	0,084127	17,805	0,093280
6	14,054	0,076410	16,148	0,085099
5	12,015	0,067237	14,405	0,075244
4	9,976	0,056837	12,582	0,063913
3	7,937	0,045431	10,743	0,051306
2	5,897	0,033181	9,480	0,037560
1	4,014	0,019710	1,999	0,022255
0	-	0	-	0



Gambar 4.14 Momen hasil analisis efek P-delta (a) arah sumbu x (b) arah sumbu (y)

Gambar 4.14 merupakan momen lentur pada ujung-ujung kolom dan balok, baik hasil analisis linear maupun hasil analisis efek P-delta dengan iterasi. Dari gambar tersebut dapat dihitung faktor pembesaran momen (“momen magnification faktor”) untuk kolom di setiap lantai, yang didefinisikan sebagai rasio antara momen lentur yang diperoleh dari analisis iterasi efek P-delta dengan momen lentur yang diperoleh dari analisis linear, yaitu sebagai berikut ini.

Tabel 4.10 Faktor pembesaran momen dengan iterasi

Tingkat ke-i	Faktor pembesaran momen	
	Portal sumbu x	Portal sumbu y
10	1,000	1,003
9	1,005	1,008
8	1,015	1,014
7	1,023	1,021
6	1,033	1,033
5	1,042	1,037
4	1,052	1,046
3	1,063	1,055
2	1,085	1,069
1	1,086	1,104

4.3.2 Metode Faktor Amplifikasi

Seperti telah diuraikan pada bab terdahulu, metode ini merupakan metode yang sederhana dan umum dipakai. Dengan cara ini dapat diketahui defleksi dan momen akhir hanya dengan mengalikan faktor pembesaran yang sesuai baik untuk defleksi dan momen hasil analisis linear.

Faktor pembesaran yang terjadi untuk masing-masing tingkat akan diuraikan sebagai berikut ini.

~ **Arah sumbu x**

$$E = 4700 \sqrt{f'c} = 4700 \sqrt{30} = 25743 \text{ Mpa} = 2625786 \text{ t/m}^2$$

$$I_{c1} = 1/12 \cdot b \cdot h^3 = 1/12 \cdot 0,65 \cdot 0,65^3 = 0,014876 \text{ m}^4$$

$$I_{c2} = 1/12 \cdot 0,80 \cdot 0,80^3 = 0,034133 \text{ m}^4$$

$$\frac{I_{c1}}{h} = \frac{0,014876}{3,7} = 0,0040205 \text{ m}^3$$

$$\frac{I_{c2}}{h} = \frac{0,034133}{7} = 0,0048761 \text{ m}^3$$

$$I_{g1} = 1/12 \cdot 0,30 \cdot 0,60^3 = 0,00540 \text{ m}^4$$

$$I_{g2} = 1/12 \cdot 0,40 \cdot 0,70^3 = 0,01143 \text{ m}^4$$

$$\frac{I_{g1}}{L} = \frac{0,00540}{6} = 0,000900 \text{ m}^3$$

$$\frac{I_{g2}}{L} = \frac{0,01143}{6} = 0,001905 \text{ m}^3$$

$$\text{Beban tekuk kritis } P_{icr} = \frac{12 E}{h_i (1/C_i + 1/G_i)}$$

$$C_i = \Sigma (I_{c_i} / h_i), \quad G_i = \Sigma (I_{g_i} / L_i)$$

$$\text{Faktor pembesaran/amplifikasi } F_i = \frac{1}{1 - (P_i / P_{icr})}$$

$$\text{Defleksi akhir } \Delta^* = F \cdot \Delta = \frac{1}{1 - (P_i / P_{icr})} \cdot \Delta$$

$$\text{Momen akhir } M^* = \frac{1}{1 - (P_i / P_{icr})} \cdot M$$

Lantai 10

$$C_{10} = \Sigma (I c_1 / h) = 6 (0,0040205) = 0,024123 \text{ m}^3$$

$$G_{10} = \Sigma (I g_1 / L) = 5 (0,000900) = 0,00450 \text{ m}^3$$

$$P_{10 \text{ cr}} = \frac{12 E}{h (1/C_1 + 1/G_1)} = \frac{12 \cdot 2625786}{3,7 (1/0,024123 + 1/0,00450)}$$

$$= 32297,398 \text{ ton}$$

$$P_{10} = 333,56 \text{ ton}$$

$$F = \frac{1}{1 - (P_{10} / P_{10 \text{ cr}})} = \frac{1}{1 - (333,56 / 32297,398)} = 1,010$$

$$\Delta^* = F \cdot \Delta = 1,010 \cdot 0,095054 = 0,096005 \text{ m}$$

$$M^+_* = F \cdot M^+ = 1,010 \cdot 21,38 = 21,59 \text{ tm}$$

$$M^-_* = F \cdot M^- = 1,010 \cdot 29,65 = 29,95 \text{ tm}$$

Untuk tingkat lainnya akan diuraikan dalam bentuk tabel di bawah ini.

Tabel 4.11 Hasil metode faktor amplifikasi arah sumbu x

Tingkat ke-i	Beban tekuk kritis P_{cr} (ton)	Beban aksial total ΣP (ton)	Faktor amplifikasi F	Defleksi akhir Δ^* (m)	Momen akhir M^*	
					M^+ (tm)	M^- (tm)
10	32297,398	333,56	1,010	0,095909	21,59	29,95
9	58153,505	892,46	1,016	0,093491	28,05	37,08
8	58153,505	1451,35	1,026	0,090212	33,86	42,74
7	58153,505	2010,23	1,036	0,085029	39,19	46,67
6	58153,505	2569,12	1,046	0,078027	43,95	50,51
5	58153,505	3128,01	1,057	0,069412	48,06	53,64
4	58153,505	3688,90	1,068	0,059484	51,42	56,08
3	58153,505	4245,77	1,079	0,048027	53,90	57,97
2	58153,505	4804,67	1,090	0,035421	50,38	60,00
1	32344,725	5573,56	1,208	0,021376	169,12	81,78

~ Arah sumbu y

$$E = 25743 \text{ Mpa}$$

$$= 2625786 \text{ t/m}^2$$

$$I_{c1} = 1/12 \cdot 0,65 \cdot 0,65^3$$

$$= 0,014876 \text{ m}^4$$

$$I_{c2} = 1/12 \cdot 0,80 \cdot 0,80^3$$

$$= 0,034133 \text{ m}^4$$

$$\frac{I_{c1}}{h} = \frac{0,014876}{3,7} = 0,00402 \text{ m}^3$$

$$\frac{I_{c2}}{h} = \frac{0,034133}{7} = 0,00487 \text{ m}^3$$

$$I_{g1} = 1/12 \cdot 0,30 \cdot 0,40^3 = 0,00160 \text{ m}^4$$

$$I_{g2} = 1/12 \cdot 0,35 \cdot 0,75^3 = 0,01230 \text{ m}^4$$

$$I_{g3} = 1/12 \cdot 0,40 \cdot 0,60^3 = 0,00720 \text{ m}^4$$

$$I_{g4} = 1/12 \cdot 0,50 \cdot 0,80^3 = 0,02133 \text{ m}^4$$

$$\frac{I_{g1}}{L} = \frac{0,00160}{4} = 0,00040 \text{ m}^3$$

$$\frac{I_{g2}}{L} = \frac{0,01230}{10} = 0,00123 \text{ m}^3$$

$$\frac{I_{g3}}{L} = \frac{0,00720}{4} = 0,00180 \text{ m}^3$$

$$\frac{I_{g4}}{L} = \frac{0,02133}{10} = 0,002133 \text{ m}^3$$

Perhitungan untuk masing-masing tingkat disajikan dalam tabel berikut ini.

Tabel 4.12 Hasil metode faktor amplifikasi arah sumbu y

Tingkat ke-i	Beban tekuk kritis P_{cr} (ton)	Beban aksial total ΣP (ton)	Faktor amplifikasi F	Defleksi akhir Δ^* (m)	Momen akhir M^*	
					M^+ (tm)	M^- (tm)
10	20678,12	282,85	1,014	0,098947	64,60	81,42
9	37508,70	771,72	1,021	0,096356	70,76	78,67
8	37508,70	1260,57	1,035	0,093326	78,38	86,70
7	37508,70	1749,44	1,050	0,088333	85,66	93,10
6	37508,70	2238,31	1,063	0,081224	92,15	98,67
5	37508,70	2727,15	1,078	0,071944	98,08	103,69
4	37508,70	3216,02	1,095	0,062237	103,32	107,97
3	37508,70	3704,88	1,109	0,050283	107,64	111,51
2	37508,70	4193,73	1,126	0,037362	107,45	114,86
1	26480,58	4822,60	1,222	0,024086	200,21	137,96