

BAB V

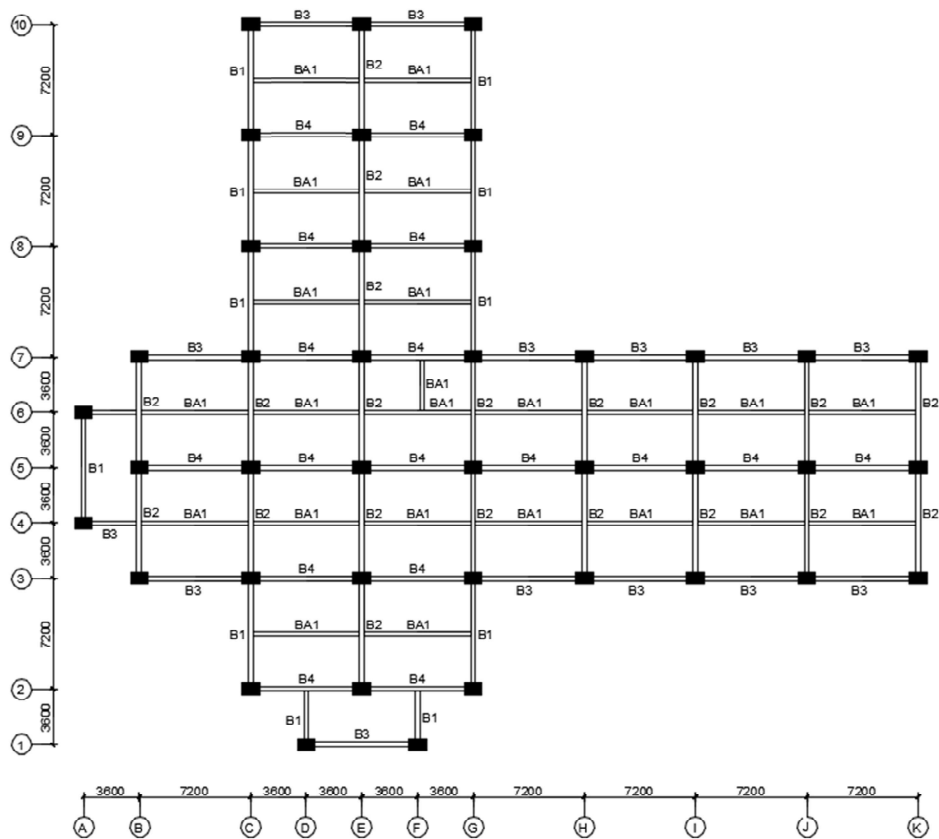
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Preliminary Design

Pada bagian ini akan didisain empat buah model bangunan dengan denah berbentuk L. Model 1 menggunakan kolom persegi panjang ditempatkan memanjang arah x sumbu global bangunan, model 2 menggunakan kolom persegi panjang ditempatkan memanjang arah y sumbu global bangunan, model 3 menggunakan kolom persegi panjang ditempatkan secara kombinasi, dan model 4 menggunakan kolom bujur sangkar.

5.1.1 Balok

Berikut ini dicontohkan perhitungan estimasi dimensi balok pada model 1 yang dibuat sama untuk balok pada pemodelan lainnya. Kodefikasi balok dapat dilihat pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 Denah Balok Model 1

Sesuai dengan SNI 2847-2013 Pasal 9.5, disain dimensi balok adalah sebagai berikut:

1. Balok 1 (B1)

Panjang bentang (L) = 7200 mm

Tinggi minimum balok (H) jika kedua ujung tertumpu sederhana digunakan persamaan berikut.

$$H = 1/16 \times L$$

Untuk mendapatkan balok yang lebih kaku, mengurangi penggunaan tulangan, dan untuk mendapatkan faktor reduksi $\Phi > 0,8$ maka pendekatan untuk balok dengan kedua ujung tertumpu sederhana digunakan persamaan berikut.

$$H = (1/10 - 1/12) \times L$$

$$H = 1/12 \times 7200 = 600 \text{ mm}$$

$$B = H/2$$

$$B = 600/2 = 300 \text{ mm}$$

$$B/H = 300/600$$

$B/H = 0,5 > 0,3$ dan $b \geq 250 \text{ mm} \rightarrow$ syarat SRMPK terpenuhi.

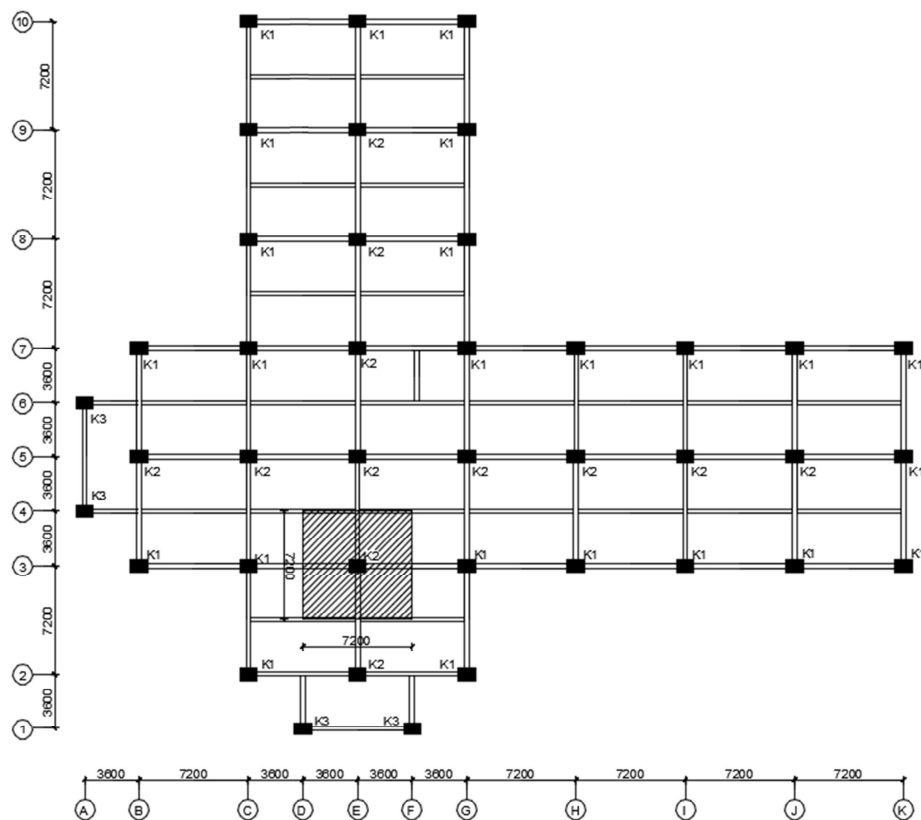
Untuk perhitungan estimasi ukuran balok yang lain karena memiliki tipe yang sama maka dilakukan dengan cara yang sama sehingga hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Rekap Ukuran Balok

| Balok | L (m) | Dimensi | |
|-------|-------|---------|--------|
| | | H (mm) | B (mm) |
| B1 | 7,2 | 600 | 300 |
| B2 | 7,2 | 600 | 300 |
| B3 | 7,2 | 600 | 300 |
| B4 | 7,2 | 600 | 300 |
| BA1 | 7,2 | 480 | 240 |
| BA2 | 7,2 | 480 | 240 |

5.1.2 Kolom

Perhitungan estimasi dimensi kolom disamakan dari lantai 1 sampai lantai 9 berdasarkan berat ekuivalen dari pelat lantai di atasnya serta beban aksial dari daerah yang ditopang oleh kolom tersebut. dibawah ini dicontohkan perhitungan estimasi dimensi kolom K2 lantai 1 pada model 1 yang dibuat sama untuk kolom pada model 2, model 3, dan model 4. Kodefikasi balok dapat dilihat pada Gambar 5.2 berikut.



Gambar 5.2 *Tributary Area* Kolom Model 1

Berat ekuivalen diperoleh dari kombinasi ultimit pembebanan pelat pada *tributary area* yang ditopang kolom.

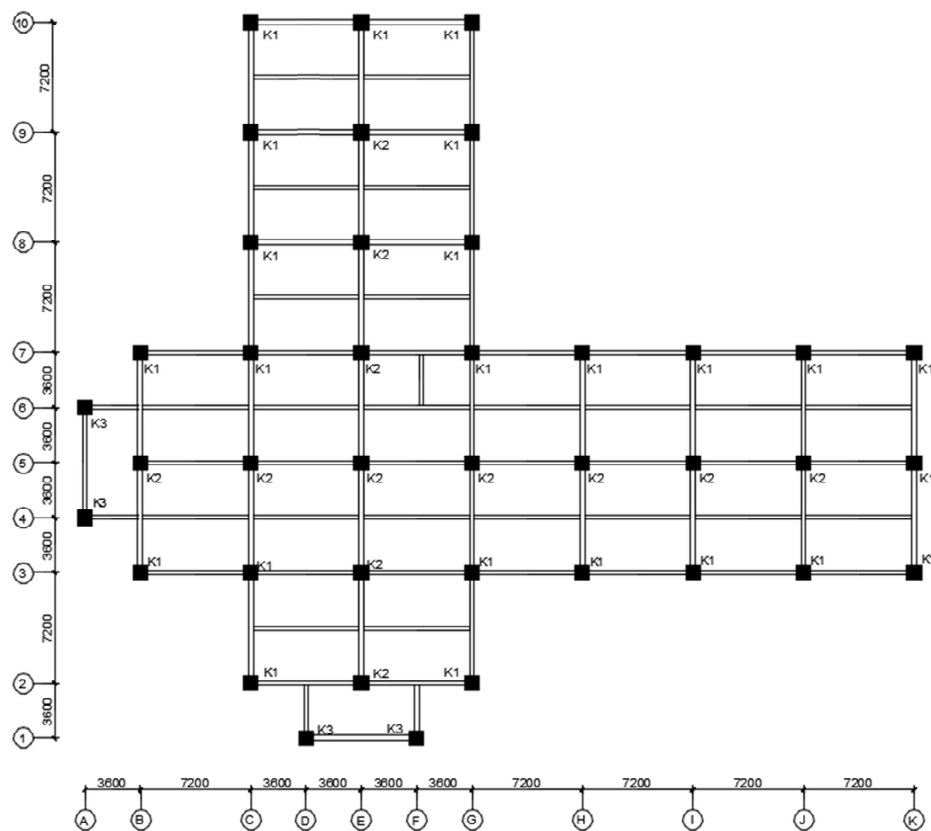
$$\begin{aligned} Q_u &= 1,2Q_D + 1,6Q_L \\ &= (1,2 \times 4,336) + (1,6 \times 2,5) \\ &= 9,204 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_u &= \text{Luas area} \times Q_u \times n \text{ Lantai} \\ &= (7,2 \text{ m} \times 7,2 \text{ m}) \times 9,204 \text{ kN/m}^2 \times 9 \\ &= 2861,577 \text{ kN} = 2861577,642 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{g \min} &= \frac{P_u}{0,4 \times \phi \times f'_c} \\
 &= \frac{2861577,642}{0,4 \times 0,75 \times 30} \\
 &= 317953,0714 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_{\min} &= \sqrt{A_g} \\
 &= \sqrt{317953,0714} \\
 &= 563,873 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan estimasi dimensi kolom dilakukan dengan cara *trial-error* hingga diperoleh dimensi yang memenuhi persyaratan simpangan antar lantai sesuai SNI 1726:2012 tanpa memperhatikan praktik di lapangan, sehingga diperoleh estimasi dimensi untuk kolom bujur sangkar dengan dimensi B = 930 mm dan H = 930 mm sedangkan untuk kolom persegi panjang dengan dimensi B = 755 mm dan H = 1116 mm. Kodefikasi kolom dapat dilihat pada Gambar 5.3.



Gambar 5.3 Denah Kolom Model 4

Estimasi dimensi kolom dari lantai 1 sampai lantai 9 dan untuk semua model disamakan sehingga hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 5.2.

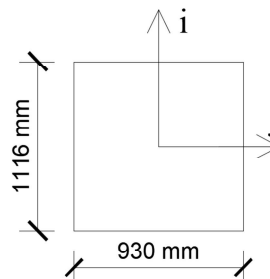
Tabel 5.2 Rekap Ukuran Kolom

| Kolom | Kolom Bujur Sangkar | | Kolom Persegi Panjang | |
|-------|---------------------|--------|-----------------------|--------|
| | H (mm) | B (mm) | H (mm) | B (mm) |
| K1 | 930 | 930 | 1116 | 775 |
| K2 | 930 | 930 | 1116 | 775 |
| K3 | 930 | 930 | 1116 | 775 |

Selanjutnya perlu dilakukan kontrol terhadap nilai kekakuan pada kedua arah bagian penampang. Dibawah ini kontrol nilai kekakuan pada kedua bagian penampang kolom persegi panjang yang digunakan pada model 1, model 2, dan model 3, serta kolom bujur sangkar yang digunakan pada model 4.

a. Kolom bujur sangkar

Terlebih dulu dicari nilai momen inersia kolom (I_k) serta nilai modulus elastisitas beton.



Gambar 5.5 Arah Penampang Kolom Bujur Sangkar

$$\begin{aligned}
 E &= 4700 \times \sqrt{f'_c} \\
 &= 4700 \times \sqrt{30} \\
 &= 25742,9602 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$L_k = 3900 \text{ mm}$$

Inersia kolom

$$\begin{aligned}
 I_{kj} &= \frac{1}{12} \times B \times H^3 \\
 &= \frac{1}{12} \times 930 \times 930^3 \\
 &= 62337667500,00 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

$$EI_{kj} = 25742,9602 \times 62337667500,00$$

$$= 1,605 \times 10^{15}$$

Kekakuan arah j

$$k_{kj} = \frac{12EI_{kj}}{L_k^3}$$

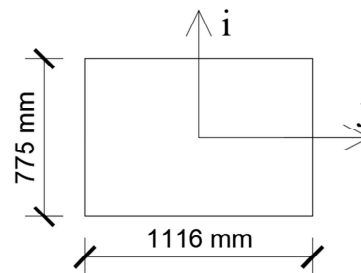
$$= \frac{12 \times 1,605 \times 10^{15}}{3900^3}$$

$$= 324685,177 \text{ N/mm}$$

Karena panjang bagian pada kedua arah penampang kolom nilainya sama, maka nilai kekakuan pada kedua arah penampang kolom juga sama.

$$k_{ki} = 324685,177 \text{ N/mm}$$

b. Kolom persegi panjang



Gambar 5.4 Arah Penampang Kolom Persegi Panjang

Inersia arah memanjang (arah j)

$$I_{kj} = \frac{1}{12} \times B \times H^3$$

$$= \frac{1}{12} \times 775 \times 1116^3$$

$$= 89766241200,00 \text{ mm}^4$$

Inersia arah memendek (arah i)

$$I_{ki} = \frac{1}{12} \times B \times H^3$$

$$= \frac{1}{12} \times 1116 \times 775^3$$

$$= 43290046875,00 \text{ mm}^4$$

Kekakuan arah memanjang (arah j)

$$EI_{kj} = 25742,9602 \times 89766241200,00$$

$$= 2,311 \times 10^{15}$$

$$k_{kj} = \frac{12EI_{kj}}{L_k^3}$$

$$= \frac{12 \times 2,311 \times 10^{15}}{3900^3}$$

$$= 467506,195 \text{ N/mm}$$

Kekakuan arah memendek (arah i)

$$EI_{ki} = 25742,9602 \times 43290046875$$

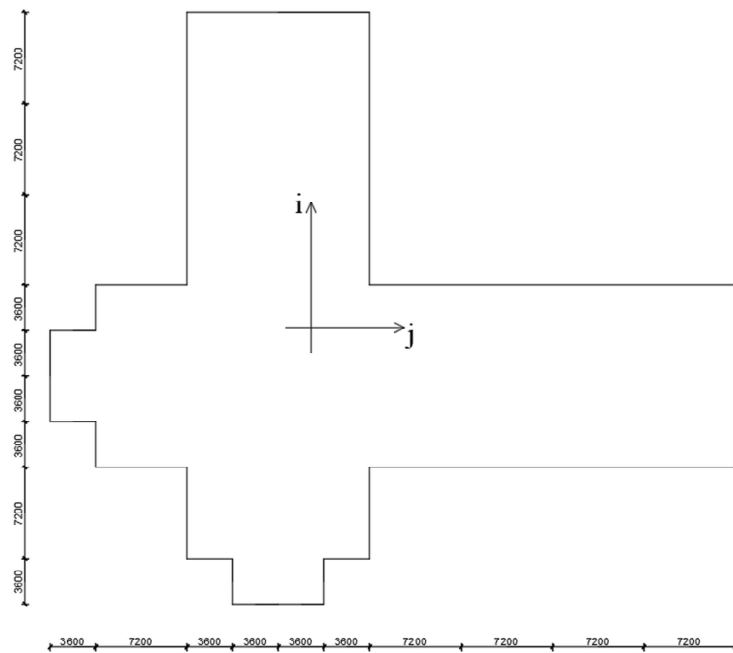
$$= 1,114 \times 10^{15}$$

$$k_{ki} = \frac{12EI_{ki}}{L_k^3}$$

$$= \frac{12 \times 1,114 \times 10^{15}}{3900^3}$$

$$= 225357,811 \text{ N/mm}$$

Nilai inersia dan kekakuan pada kolom persegi panjang diatas digunakan dalam menentukan penempatan kolom pada model 3 dimana nilai inersia arah memanjang pada penampang kolom yang disimbolkan dengan I_{kj} lebih besar daripada nilai inersia arah memendek pada penampang kolom yang disimbolkan dengan I_{ki} sehingga pada arah memanjang kolom nilai kekakuan juga lebih besar dibanding arah memendek kolom. Nilai inersia tersebut akan disesuaikan dengan inersia bentang struktur yang dicari lewat bantuan program *AutoCAD* karena memiliki bentuk yang tidak beraturan ditunjukkan pada Gambar 5.6 sehingga diperoleh nilai inersia yang dapat dilihat pada Gambar 5.7 berikut.



Gambar 5.6 Arah Bentang Struktur

```

AutoCAD Text Window - Denah.dwg
Edit

Command: MASSPROP
Select objects: 1 found
Select objects:
----- REGIONS -----
Area: 1192320000.0000
Perimeter: 201600.0000
Bounding box: X: 279587.2502 -- 333587.2502
               Y: -24582.2955 -- 22217.7045
Centroid: X: 303808.9893
           Y: -3177.9476
Moments of inertia: X: 1.4312E+17
                   Y: 1.1026E+20
Product of inertia: XY: 1.1764E+18
Radii of gyration: X: 10955.9685
                  Y: 304093.5250
Principal moments and X-Y directions about centroid:
I: 1.2338E+17 along [0.9566 -0.2916]
J: 2.1393E+17 along [0.2916 0.9566]

Write analysis to a file? [Yes/No] <N>:

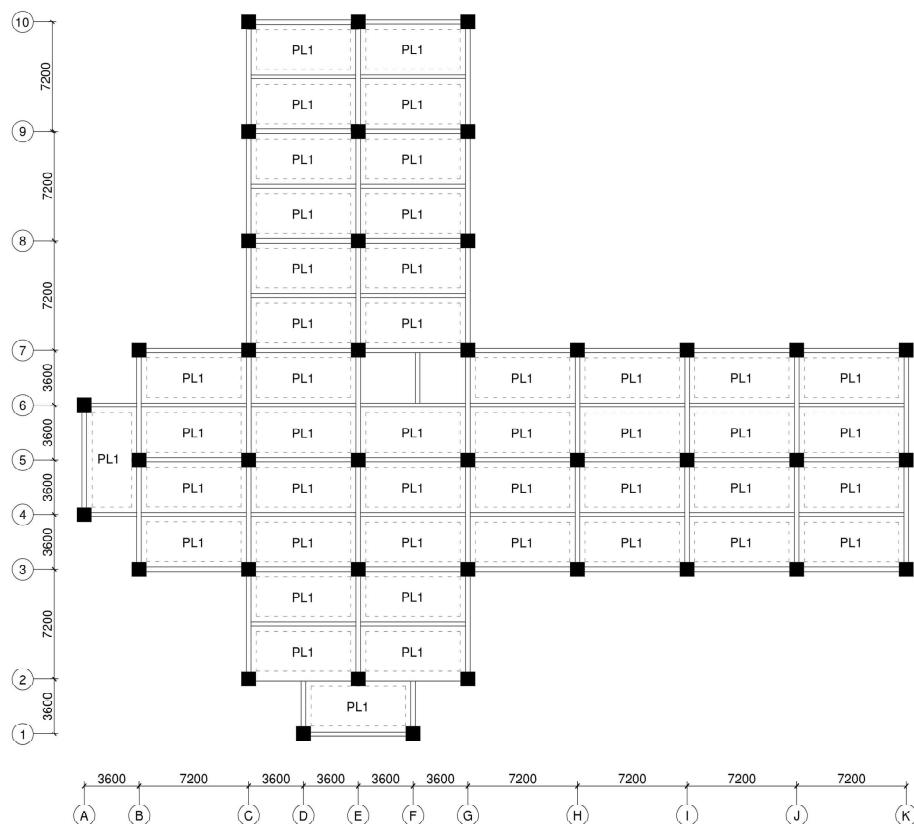
```

Gambar 5.7 Inersia Bentang Struktur

Berdasarkan Gambar 5.7 diperoleh nilai inersia arah memanjang bentang struktur yang disimbolkan dengan I_j sebesar $2,139 \times 10^{17} \text{ mm}^4$ lebih besar daripada nilai inersia arah memendek bentang struktur yang disimbolkan dengan I_i sebesar $1,233 \times 10^{17} \text{ mm}^4$, sehingga pada model 3 kolom ditempatkan memanjang arah i untuk bentang yang memanjang arah j dan penempatan kolom memanjang arah j untuk bentang yang memanjang arah i dengan harapan penempatan kolom tersebut mampu memberikan nilai kekakuan dan daktilitas yang lebih baik di kedua arah, artinya tidak besar di arah tertentu namun kecil di arah sebaliknya.

5.1.3 Pelat

Dibawah ini dicontohkan perhitungan estimasi tebal pelat lantai tipe 1 (PL2) pada model 4 lantai 1 yang dibuat sama untuk pelat pada pemodelan dan lantai lainnya. Kodefikasi pelat dapat dilihat pada Gambar 5.8.



Gambar 5.8 Denah Pelat Model 4

$$F_y = 300 \text{ MPa}$$

$$L_y = 7200 \text{ mm}$$

$$L_x = 3600 \text{ mm}$$

$$\frac{L_y}{L_x} = \frac{7200}{3600} = 2 \geq 2$$

Sehingga dianggap sebagai pelat satu arah

$$\text{Bentang pelat (L)} = 3600 \text{ mm}$$

Untuk kedua ujung menerus maka

$$h_{\min} = \frac{1}{21} L \left(0,4 + \frac{f_y}{700} \right)$$

$$h_{\min} = \frac{1}{21} 3600 \left(0,4 + \frac{300}{700} \right)$$

$$h_{\min} = 142,041 \text{ mm}$$

digunakan tebal pelat lantai $h_{\text{pakai}} = 150 \text{ mm}$

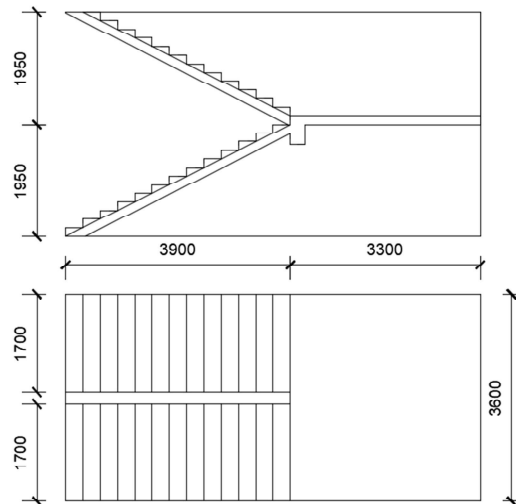
Estimasi tebal pelat lantai dan pelat atap untuk tipe lain dan untuk semua model disamakan sehingga hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Rekap Tebal Pelat Lantai (PL) Dan Pelat Atap (PA)

| Pelat | H pakai (mm) |
|-------|--------------|
| PL1 | 150 |
| PL2 | 120 |
| PA1 | 150 |
| PA2 | 100 |

5.1.4 Tangga

Perencanaan tangga dapat dilihat pada Gambar 5.9 berikut.



Gambar 5.9 Denah Tangga

Panjang ruang tangga = 7200 mm

Lebar ruang tangga = 2400 mm

Tinggi antar lantai = 3900 mm

Lebar tangga = 1700 mm

Jarak antar tangga = 200 mm

Tinggi *Uptrede* (s) = 150 mm

Lebar *Antrede* (a) = 300 mm

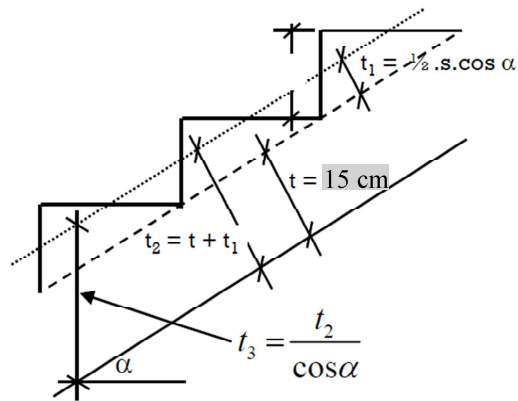
Tebal pelat tangga (t) = 150 mm

$$\begin{aligned} \text{Jumlah anak tangga (n)} &= \frac{\text{Tinggi antar lantai}}{\text{Tinggi Uptrede}} - 1 \\ &= \frac{3900}{150} - 1 \\ &= 25 \text{ buah} \end{aligned}$$

Digunakan 25 buah anak tangga masing-masing 13 buah di bawah bordes dan 12 buah di atas bordes.

$$\begin{aligned} \text{Sudut tangga } (\alpha) &= \tan^{-1} \left(\frac{s}{a} \right) \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{150}{300} \right) \\ &= 26,565^\circ \end{aligned}$$

Tebal pelat tangga (t) = 150 mm merupakan tebal miring, perlu dicari tebal vertikalnya untuk menghitung beban berat sendiri. Mencari tebal vertical tangga dapat dilihat pada Gambar 5.10 berikut.



Gambar 5.10 Mencari Tinggi Vertikal

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{1}{2} S \cdot \cos \alpha \\ &= \frac{1}{2} 150 \cdot \cos 26,565 \\ &= 67,082 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_2 &= t + t_1 \\ &= 150 + 67,082 \\ &= 217,082 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_3 &= \frac{t_2}{\cos \alpha} \\ &= \frac{217,082}{\cos 26,56} \\ &= 242,705 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Panjang tangga} &= n \times a \\ &= 13 \times 300 \\ &= 3900 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Panjang Bordes} &= \text{Panjang ruang} - \text{panjang tangga} \\ &= 7200 - 3900 \\ &= 3300 \text{ mm} \end{aligned}$$

5.2 Pembebanan

Beban-beban yang digunakan dalam penelitian ini berupa beban hidup dan beban mati yang didasarkan pada Pedoman Perencanaan Pembebanan Untuk Rumah dan Gedung (PPPURG) 1987, serta beban gempa berdasarkan SNI 03-1726:2012.

5.2.1 Beban Mati

Beban mati terdiri dari beban mati yang berasal dari berat sendiri struktur dan berat mati tambahan, sesuai dengan sistem struktur dan material yang digunakan. Pembebanan yang perlu dimasukkan hanya dari berat mati tambahan karena ETABS 2013 secara otomatis sudah menghitung berat sendiri struktur.

1. Pelat

Perhitungan beban pada pelat disajikan dalam Tabel 5.4 sampai 5.5 berikut.

Tabel 5.4 Beban Mati pada Pelat Lantai

| Unit | Berat Jenis (kN/m ³) | Tebal (m) | Berat Beban (kN/m ²) |
|-------------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|
| Keramik | | | 0,172 |
| Spesi | 19,13 | 0,02 | 0,383 |
| Pasir | 17,658 | 0,03 | 0,529 |
| Plafon | | | 0,108 |
| Penggantung | | | 0,069 |
| Ducting Ac | | | 0,196 |
| Qd lantai | | | 1,457 |

Tabel 5.5 Beban Mati pada Pelat Atap

| Unit | Berat Jenis (kN/m ³) | Tebal (m) | Berat Beban (kN/m ²) |
|-------------------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|
| Lapisan Kedap Air | 18,639 | 0,03 | 0,559 |
| Plafon | | | 0,171 |
| Qd atap | | | 0,730 |

2. Dinding

Pada penelitian ini dinding diasumsikan dinding penuh tanpa bukaan untuk memperoleh nilai momen yang optimal pada balok, digunakan pasangan batako tanpa lubang tebal 15 cm untuk dinding yang letaknya diatas balok dalam dan pasangan batako berlubang tebal 20 cm yang letaknya diatas balok tepi. Berikut contoh perhitungan dinding pada lantai 2.

- a) Dinding diatas balok dalam

$$\begin{aligned} \text{Tinggi dinding} &= \text{Tinggi lantai} - H_{\text{balok}} \\ &= 3,9 \text{ m} - 0,6 \text{ m} \\ &= 3,3 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat dinding} &= \text{BJ pasangan batako tebal 15 cm} \times \text{Tinggi Dinding} \\ &= 1,96 \text{ kN/m}^2 \times 3,3 \text{ m} \\ &= 6,468 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

- b) Dinding diatas balok tepi

$$\begin{aligned} \text{Tinggi dinding} &= \text{Tinggi lantai} - H_{\text{balok}} \\ &= 3,9 \text{ m} - 0,6 \text{ m} \\ &= 3,3 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat dinding} &= \text{BJ pasangan batako tebal 20 cm} \times \text{Tinggi Dinding} \\ &= 2,94 \text{ kN/m}^2 \times 3,3 \text{ m} \\ &= 9,114 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

3. Tangga

Pemodelan struktur tangga dimodelkan secara terpisah diasumsikan sebagai balok sederhana horizontal dengan tujuan dapat memudahkan dalam proses pemodelan, sehingga berat sendiri perlu dimasukkan sebagai pembebanan. Perhitungan beban pada tangga dan bordes dapat dilihat dalam Tabel 5.6 dan Tabel 5.7 berikut.

Tabel 5.6 Beban Mati pada Pelat Tangga

| Unit | Berat Jenis (kN/m ³) | Tebal (m) | Lebar (m) | Berat Beban (kN/m) |
|--------------|----------------------------------|-----------|-----------|--------------------|
| Pelat tangga | 24 | 0,243 | 1,7 | 9,9024 |
| Keramik | 0,17167 | | 1,7 | 0,0029 |
| Spesi | 19,13 | 0,02 | 1,7 | 0,6504 |
| Pasir | 17,658 | 0,03 | 1,7 | 0,9006 |
| Qd tangga | | | | 11,456 |

Tabel 5.7 Beban Mati pada Pelat Bordes

| Unit | Berat Jenis (kN/m ³) | Tebal (m) | Lebar (m) | Berat Beban (kN/m) |
|--------------|----------------------------------|-----------|-----------|--------------------|
| Pelat bordes | 24 | 0,15 | 1,7 | 6,12 |
| Keramik | 0,17167 | | 1,7 | 0,0029 |
| Spesi | 19,13 | 0,02 | 1,7 | 0,6504 |
| Pasir | 17,658 | 0,03 | 1,7 | 0,9006 |
| Qd tangga | | | | 7,6738 |

5.2.2 Beban Hidup

Beban hidup dibedakan atas fungsi bangunan berdasarkan PPRURG 1987. Fungsi bangunan pada penelitian ini adalah Hotel, sehingga diperoleh beban hidup sebagai berikut.

1. Beban Hidup pada pelat lantai
 $QL_{\text{lantai}} = 2,5 \text{ kN/m}^2$
2. Beban Hidup pada pelat atap
 $QL_{\text{atap}} = 1 \text{ kN/m}^2$
3. Beban Hidup pada pelat tangga dan bordes
 $QL_{\text{tangga borde}} = 3 \text{ kN/m}^2$

5.2.3 Beban Gempa

5.2.3.1 Disain Respon Spektrum

Parameter yang diperlukan untuk mendisain respon spektrum adalah sebagai berikut.

1. Lokasi bangunan : Yogyakarta
2. Fungsi bangunan : Hotel
3. Jenis tanah : Tanah Sedang
4. Kategori risiko dan faktor keutamaan didasarkan pada Tabel 3.4 dan Tabel 3.5. Gedung hotel termasuk kategori risiko II, dengan faktor keutamaan $I_e = 1$
5. Sistem struktur penahan beban gempa merupakan sistem rangka beton bertulang pemikul momen khusus dengan didasarkan pada Tabel 3.8 diperoleh nilai koefisien modifikasi respon $R = 8$, faktor kuat lebih sistem $C_d = 5,5$ dan faktor pembesaran defleksi $\Omega_0 = 3$
6. Parameter Percepatan Gempa
Nilai parameter percepatan gempa diperoleh dari peta zonasi gempa pada Gambar 3.3 dan Gambar 3.4. Untuk kota Yogyakarta diperoleh nilai $S_s = 1,2g$ dan $S_1 = 0,4g$.
7. Koefisien Risiko Terpetakan
Nilai koefisien risiko terpetakan diperoleh dari peta zonasi pada Gambar 3.5 dan Gambar 3.6 berdasarkan SNI 1726:2012. Untuk kota Yogyakarta diperoleh nilai $C_{RS} = 1$ dan $C_{RI} = 1$.
8. Koefisien Situs
Berdasarkan Tabel 3.2 dan Tabel 3.3 diperoleh nilai $F_a = 1,015$ dan $F_v = 1,55$.
9. Parameter Respon Spektrum
Sebelum menentukan parameter respon spektrum, perlu ditentukan hubungan koefisien-koefisien situs dengan parameter spektrum respons sebagai berikut.

- a) Parameter spektrum respons percepatan pada perioda pendek (S_{MS}) dan perioda satu detik (S_{MI}) sesuai Persamaan (3.40) dan (3.41)

$$\begin{aligned} S_{MS} &= F_a \times S_s \\ &= 1,015 \times 1,2 \\ &= 1,23 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{MI} &= F_v \times S_1 \\ &= 1,55 \times 0,4 \\ &= 0,69 \end{aligned}$$

- b) Parameter percepatan disain untuk perioda pendek (S_{DS}) dan perioda satu detik (S_{D1}) sesuai Persamaan (3.42) dan (3.43)

$$\begin{aligned} S_{DS} &= 2/3 \times S_{MS} \times C_{RS} \\ &= 2/3 \times 1,23 \times 1 \\ &= 0,82 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{D1} &= 2/3 \times S_{MI} \times C_{R1} \\ &= 2/3 \times 0,69 \times 1 \\ &= 0,46 \end{aligned}$$

- c) Kurva respon spektrum disain ditentukan dengan mengacu pada beberapa ketentuan pada SNI 1726:2012 Pasal 6.4.

$$\begin{aligned} T_0 &= 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \\ &= 0,2 \frac{0,46}{0,82} \\ &= 0,112 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_S &= \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \\ &= \frac{0,46}{0,82} \\ &= 0,561 \end{aligned}$$

- 1) Untuk perioda yang lebih kecil dari T_0 , lihat Persamaan (3.46)

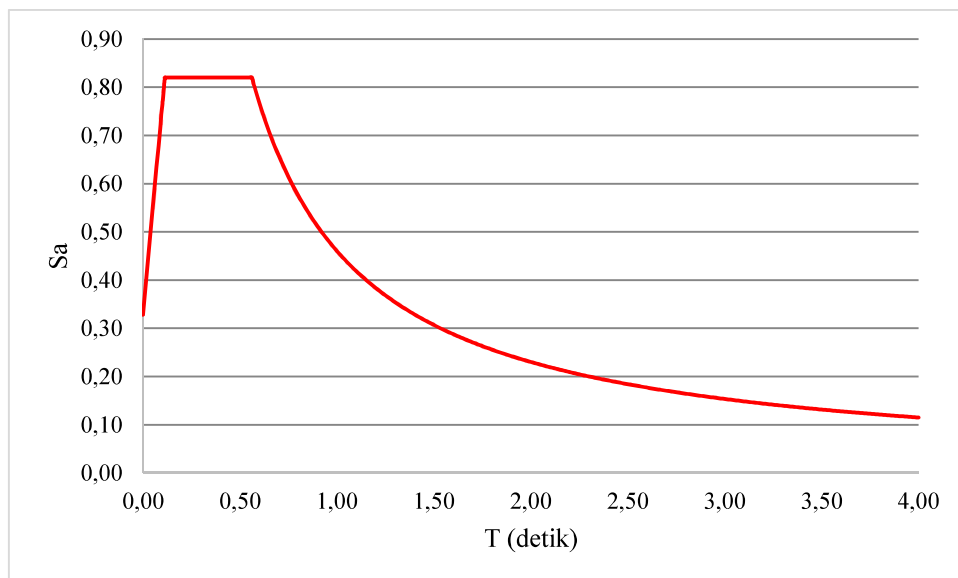
$$\begin{aligned} S_a &= S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \\ &= 0,82 \left(0,4 + 0,6 \frac{0}{0,112} \right) \\ &= 0,328 \end{aligned}$$

- 2) Untuk perioda yang lebih besar dari T_0 tetapi lebih kecil dari T_S , maka $S_a = S_{DS} = 0,82$

- 3) Untuk perioda lebih besar dari T_S , lihat Persamaan (3.47)

$$\begin{aligned} S_a &= \frac{S_{DS}}{T} \\ &= \frac{0,82}{0,57} \\ &= 0,808 \end{aligned}$$

Berdasarkan parameter yang ada maka diperoleh grafik respon spektrum yang mengacu pada Gambar 3.7, ditunjukkan pada Gambar 5.11 berikut.



Gambar 5.11 Kurva Respon Spektrum

5.2.3.2 Beban Gempa Ekuivalen Statik

Parameter yang diperlukan untuk menentukan beban gempa ekuivalen statik adalah sebagai berikut.

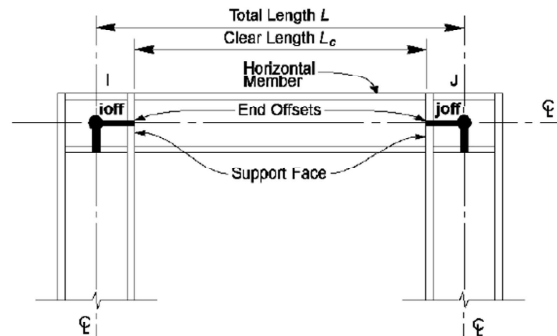
1. Berat Seismik Efektif

Berat seismik efektif harus menyertakan semua beban mati dan beban lainnya. Berat seismik efektif dihitung secara otomatis oleh program ETABS 2013 yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 5.8 berikut.

Tabel 5.8 Berat Struktur

| Lantai | Tinggi (H) m | Berat (W) kN | | | |
|------------------|-----------------|--------------|----------|----------|----------|
| | | Model 1 | Model 2 | Model 3 | Model 4 |
| 9 | 35,1 | 9234,2 | 9274,0 | 9263,7 | 9256,1 |
| 8 | 31,2 | 15734,2 | 15774,0 | 15763,7 | 15756,0 |
| 7 | 27,3 | 15734,2 | 15774,0 | 15763,7 | 15756,0 |
| 6 | 23,4 | 15734,2 | 15774,0 | 15763,7 | 15756,0 |
| 5 | 19,5 | 15734,2 | 15774,0 | 15763,7 | 15756,0 |
| 4 | 15,6 | 15734,2 | 15774,0 | 15763,7 | 15756,0 |
| 3 | 11,7 | 15734,2 | 15774,0 | 15763,7 | 15756,0 |
| 2 | 7,8 | 15734,2 | 15774,0 | 15763,7 | 15756,0 |
| 1 | 3,9 | 15734,2 | 15774,0 | 15763,7 | 15756,0 |
| Total Berat (Wt) | | 133184,2 | 135107,8 | 135465,8 | 135373,0 |

Perbedaan nilai berat struktur antar model disebabkan adanya *intersection* pada daerah pertemuan (*joint*) antara elemen balok dan kolom. Dalam pemodelan elemen balok dan kolom yang memiliki dimensi penampang lebar dan tinggi dimodelkan dengan elemen *frame* yang hanya berupa garis, sehingga pada daerah sambungan akan terjadi *overlap*. Adanya perbedaan dimensi penampang kolom antara model satu dengan model yang lainnya menyebabkan area *intersection* pada dimensi elemen balok dan kolom yang saling bertemu yang ditentukan secara otomatis oleh ETABS 2013 juga berbeda satu sama lain.



Gambar 5.12 *End Length Offsets*

Untuk memperhitungkan daerah sambungan semacam ini diaplikasikan lewat menu *End Length Offsets* dengan pilihan *Automatic from Connectivity*.

2. Periode Fundamental

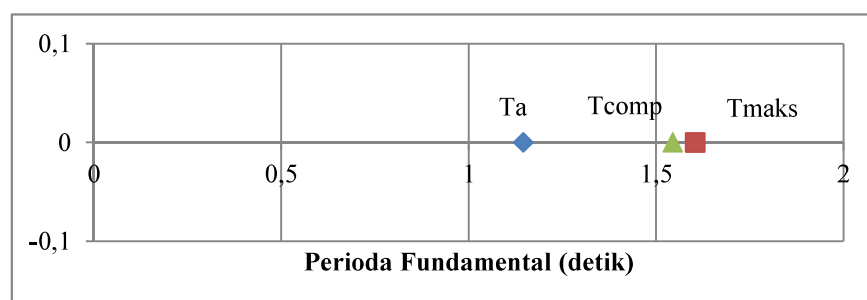
Dibawah ini dicontohkan perhitungan periode fundamental model 1. Dalam menentukan periode fundamental struktur (T) digunakan analisis program ETABS 2013 dan dapat menggunakan Persamaan (3.44).

$$\begin{aligned} T_a &= C_t \times h_n^x \\ &= 0,466 \times 35,1^{0,9} \\ &= 1,146 \text{ detik} \end{aligned}$$

$$T_{comp} = 1,545 \text{ detik}$$

Periode yang dihitung dibatasi dengan nilai $T_{a \max}$ menggunakan Persamaan (3.45).

$$\begin{aligned} T_{a \max} &= C_u \times T_a \\ &= 1,4 \times 1,146 \\ &= 1,604 \text{ detik} \end{aligned}$$



Gambar 5.13 Perbandingan Periode Fundamental Model 1

Hasil di atas dapat digunakan untuk menentukan perioda fundamental yang akan digunakan, dimana harus berdasarkan pada persyaratan berikut:

- a) Jika $T_{\text{comp}} > T_{a \text{ max}}$, digunakan $T = T_{a \text{ max}}$
- b) Jika $T_a < T_{\text{comp}} < T_{a \text{ max}}$, digunakan $T = T_{\text{comp}}$
- c) Jika $T_{\text{comp}} < T_a$, digunakan $T = T_a$

Dari persyaratan di atas, maka untuk analisis berikutnya digunakan $T = 1,545$ detik. Nilai perioda fundamental mempengaruhi dalam menentukan nilai k yang harus berdasarkan pada persyaratan berikut:

- 1) Jika nilai perioda fundamental 0,5 detik atau kurang, nilai $k = 1$
- 2) Jika nilai perioda fundamental 2,5 detik atau lebih, nilai $k = 2$
- 3) Jika nilai perioda fundamental antara 0,5 dan 2,5 detik, nilai k ditentukan dengan interpolasi linier antara 1 dan 2.

Maka nilai k yang digunakan pada model 1 dengan nilai perioda fundamental $T = 1,545$ detik ditentukan dengan menggunakan interpolasi sebagai berikut.

$$\frac{1,545 - 0,5}{2,5 - 0,5} = \frac{(k - 1)}{2 - 1}$$

$$k = 1 + \left(\frac{(1,545 - 0,5) \times (2 - 1)}{(2,5 - 0,5)} \right)$$

$$k = 1,5225$$

Untuk penentuan perioda fundamental dan nilai k pada model yang lain dilakukan dengan cara yang sama sehingga hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 5.9 berikut.

Tabel 5.9 Perioda Fundamental dan Nilai K

| Perioda Fundamental (detik) | Model 1 | Model 2 | Model 3 | Model 4 |
|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|
| T_a | 1,146 | 1,146 | 1,146 | 1,146 |
| T_{comp} | 1,545 | 1,504 | 1,463 | 1,494 |
| $T_{a \text{ max}}$ | 1,604 | 1,604 | 1,604 | 1,604 |
| T_{pakai} | 1,545 | 1,504 | 1,463 | 1,494 |
| k | 1,522 | 1,502 | 1,481 | 1,497 |

3. Koefisien Respon Seismik

Dibawah ini dicontohkan perhitungan koefisien respon seismik pada model 1 menggunakan Persamaan (3.50).

$$\begin{aligned} C_s &= \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \\ &= \frac{0,82}{\left(\frac{8}{1}\right)} \\ &= 0,102 \end{aligned}$$

Nilai C_s tersebut tidak perlu melebihi nilai $C_{s\max}$ sesuai Persamaan (3.51)

$$\begin{aligned} C_{s\max} &= \frac{S_{D1}}{T\left(\frac{R}{I_e}\right)} \\ &= \frac{0,46}{1,545\left(\frac{8}{1}\right)} \\ &= 0,0373 \end{aligned}$$

Nilai C_s tidak kurang dari $C_{s\min}$ sesuai persamaan berikut

$$\begin{aligned} C_{s\min} &= 0,044 \times S_{DS} \times I_e \\ &= 0,044 \times 0,82 \times 1 \\ &= 0,361 \end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas, digunakan nilai $C_s = 0,0373$. Untuk penentuan koefisien respon seismik pada model yang lain dilakukan dengan cara yang sama sehingga hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 5.10 berikut.

Tabel 5.10 Koefisien Respon Seismik

| Koefisien respon spektrum | Model 1 | Model 2 | Model 3 | Model 4 |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|
| C_s | 0,1025 | 0,1025 | 0,1025 | 0,1025 |
| $C_{s\max}$ | 0,0373 | 0,0383 | 0,0394 | 0,0385 |
| $C_{s\min}$ | 0,0361 | 0,0361 | 0,0361 | 0,0361 |
| C_s pakai | 0,0373 | 0,0383 | 0,0394 | 0,0385 |

4. Gaya Geser Dasar Seismik

Dibawah ini dicontohkan perhitungan gaya geser dasar seismik pada model 1 menggunakan Persamaan (3.53).

$$\begin{aligned} V &= C_S \times W_t \\ &= 0,0373 \times 135107,8 \\ &= 5034,581 \text{ kN} \end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas, diperoleh nilai gaya geser dasar seismik untuk model 1 sebesar 5034,581 kN. Untuk penentuan gaya geser dasar pada model yang lain dilakukan dengan cara yang sama sehingga hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 5.11 berikut.

Tabel 5.11 Gaya Geser Dasar Seismik

| Model | Gaya geser dasar (kN) |
|---------|-----------------------|
| Model 1 | 5034,581 |
| Model 2 | 5185,529 |
| Model 3 | 5327,199 |
| Model 4 | 5214,015 |

5. Gaya Horizontal Gempa

Perhitungan gaya horizontal (F) kN tiap lantai pada model 1 hingga model 4 dapat dilihat pada Tabel 5.12 hingga Tabel 5.15 dan disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 10.

Tabel 5.12 Distribusi Horizontal Gaya Gempa Model 1

| Lantai | W_i (kN) | h (m) | h^k | $W_i \cdot h^k$ | C_{vx} | F_i (kN) |
|--------|------------|---------|--------|-----------------|----------|------------|
| 9 | 9234,25 | 35,10 | 225,28 | 2080326,71 | 0,160 | 805,539 |
| 8 | 15734,20 | 31,20 | 188,30 | 2962749,49 | 0,228 | 1147,228 |
| 7 | 15734,20 | 27,30 | 153,66 | 2417698,79 | 0,186 | 936,175 |
| 6 | 15734,20 | 23,40 | 121,52 | 1911946,37 | 0,147 | 740,339 |
| 5 | 15734,20 | 19,50 | 92,06 | 1448512,54 | 0,111 | 560,889 |
| 4 | 15734,20 | 15,60 | 65,54 | 1031280,40 | 0,079 | 399,330 |
| 3 | 15734,20 | 11,70 | 42,30 | 665514,52 | 0,051 | 257,699 |
| 2 | 15734,20 | 7,80 | 22,81 | 358970,36 | 0,028 | 139,000 |
| 1 | 15734,20 | 3,90 | 7,94 | 124951,20 | 0,010 | 48,383 |
| Total | 135107,82 | | | 13001950,37 | 1,000 | 5034,581 |

Tabel 5.13 Distribusi Horizontal Gaya Gempa Model 2

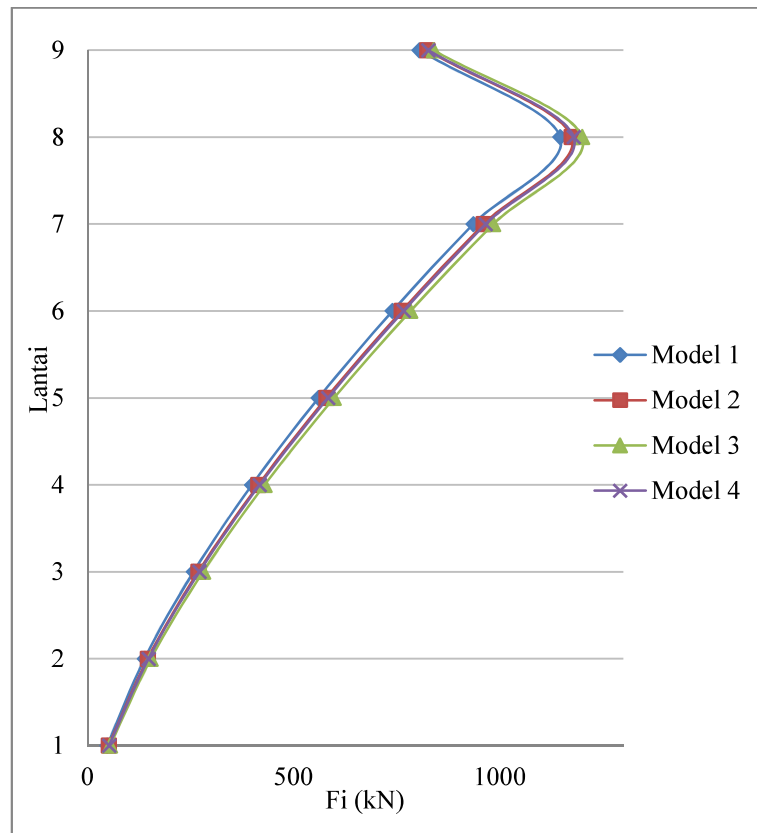
| Lantai | W_i (kN) | h (m) | h^k | $W_i \cdot h^k$ | C_{vx} | F_i (kN) |
|--------|------------|---------|--------|-----------------|----------|------------|
| 9 | 9274,02 | 35,10 | 209,44 | 1942313,58 | 0,159 | 824,423 |
| 8 | 15773,97 | 31,20 | 175,48 | 2767969,01 | 0,227 | 1174,875 |
| 7 | 15773,97 | 27,30 | 143,59 | 2264943,22 | 0,185 | 961,364 |
| 6 | 15773,97 | 23,40 | 113,91 | 1796814,49 | 0,147 | 762,665 |
| 5 | 15773,97 | 19,50 | 86,62 | 1366384,76 | 0,112 | 579,967 |
| 4 | 15773,97 | 15,60 | 61,95 | 977269,10 | 0,080 | 414,806 |
| 3 | 15773,97 | 11,70 | 40,22 | 634389,79 | 0,052 | 269,269 |
| 2 | 15773,97 | 7,80 | 21,87 | 345038,15 | 0,028 | 146,453 |
| 1 | 15773,97 | 3,90 | 7,72 | 121820,41 | 0,010 | 51,707 |
| Total | 135465,78 | | | 12216942,51 | 1,000 | 5185,529 |

Tabel 5.14 Distribusi Horizontal Gaya Gempa Model 3

| Lantai | W_i (kN) | h (m) | h^k | $W_i \cdot h^k$ | C_{vx} | F_i (kN) |
|--------|------------|---------|--------|-----------------|----------|------------|
| 9 | 9263,71 | 35,10 | 194,70 | 1803671,26 | 0,158 | 839,936 |
| 8 | 15763,66 | 31,20 | 163,53 | 2577787,14 | 0,225 | 1200,428 |
| 7 | 15763,66 | 27,30 | 134,18 | 2115105,25 | 0,185 | 984,965 |
| 6 | 15763,66 | 23,40 | 106,78 | 1683256,56 | 0,147 | 783,861 |
| 5 | 15763,66 | 19,50 | 81,51 | 1284822,99 | 0,112 | 598,318 |
| 4 | 15763,66 | 15,60 | 58,56 | 923147,54 | 0,081 | 429,893 |
| 3 | 15763,66 | 11,70 | 38,24 | 602801,57 | 0,053 | 280,714 |
| 2 | 15763,66 | 7,80 | 20,97 | 330594,16 | 0,029 | 153,952 |
| 1 | 15763,66 | 3,90 | 7,51 | 118391,15 | 0,010 | 55,133 |
| Total | 135372,98 | | | 11439577,61 | 1,000 | 5327,200 |

Tabel 5.15 Distribusi Horizontal Gaya Gempa Model 4

| Lantai | W_i (kN) | h (m) | h^k | $W_i \cdot h^k$ | C_{vx} | F_i (kN) |
|--------|------------|---------|--------|-----------------|----------|------------|
| 9 | 9256,08 | 35,10 | 205,74 | 1904371,33 | 0,159 | 826,800 |
| 8 | 15756,03 | 31,20 | 172,48 | 2717666,09 | 0,226 | 1179,899 |
| 7 | 15756,03 | 27,30 | 141,23 | 2225267,12 | 0,185 | 966,120 |
| 6 | 15756,03 | 23,40 | 112,13 | 1766699,99 | 0,147 | 767,029 |
| 5 | 15756,03 | 19,50 | 85,35 | 1344709,53 | 0,112 | 583,818 |
| 4 | 15756,03 | 15,60 | 61,11 | 962840,15 | 0,080 | 418,026 |
| 3 | 15756,03 | 11,70 | 39,73 | 625922,99 | 0,052 | 271,750 |
| 2 | 15756,03 | 7,80 | 21,65 | 341124,01 | 0,028 | 148,102 |
| 1 | 15756,03 | 3,90 | 7,67 | 120856,60 | 0,010 | 52,471 |
| Total | 135304,28 | | | 12009457,81 | 1,000 | 5214,015 |



Gambar 5.14 Distribusi Horizontal Gaya Gempa Semua Model

Berdasarkan Gambar 5.14 dapat dilihat bahwa gaya horizontal (F) tiap lantai pada model 1 hingga model 4 akan semakin besar pada tingkat lantai yang semakin tinggi karena pengaruh kuadran dalam persamaan $W_i \cdot h^k$, namun pada lantai paling atas mengecil karena berat pada lantai tersebut yaitu lantai atap lebih kecil dibanding lantai dibawahnya.

5.3 Analisis Beban Gempa

5.3.1 Kontrol Beban Gempa

Nilai gaya geser dasar respon spektrum (V_t) harus lebih besar sama dengan 85% dari gaya geser dasar statik (V). bila lebih kecil, maka perlu dikalikan dengan faktor skala. Nilai gaya geser dasar respon spektrum diperoleh dari hasil analisis struktur dengan ETABS 2013 dan 85% gaya geser dasar statik pada model 1 dapat dilihat pada Tabel 5.16 berikut.

Tabel 5.16 Kontrol Awal Gaya Geser Dasar Model 1

| Geser dasar | Vt (respon spektrum) kN | 0,85xV (statik) kN | Kontrol |
|-------------|-------------------------|--------------------|---------|
| Fx | 4733,1613 | 4279,394 | OK |
| Fy | 4247,9198 | 4279,394 | NOT OK |

Dari Tabel 5.16 disimpulkan bahwa kontrol awal gaya geser dasar pada arah Y tidak memenuhi syarat gaya geser dasar respon spektrum $V_t \geq 85\%$ gaya geser dasar V. maka spektrum respon pada arah Y peru dikalikan dengan faktor skala yang ditentukan sebagai berikut.

$$\frac{0,85 \times V}{V_t} = \frac{4279,394}{4247,9198} = 1,007$$

Setelah diperoleh faktor skala baru, dilakukan analisis ulang dengan mengalikan faktor skala yang diperoleh pada *scalefaktor respons spectra*. Kemudian diperoleh hasil yang dapat dilihat pada Tabel 5.17 berikut.

Tabel 5.17 Kontrol Akhir Gaya Geser Dasar Model 1

| Geser dasar | Vt (respon spektrum) kN | 0,85xV (statik) kN | Kontrol |
|-------------|-------------------------|--------------------|---------|
| Fx | 4733,1613 | 4279,394 | OK |
| Fy | 4279,3936 | 4279,394 | OK |

Setelah dilakukan analisis ulang, maka gaya geser dasar sudah sesuai dengan persyaratan yang ditentukan. Kontrol awal dan akhir gaya geser dasar untuk semua model dapat dilihat pada Tabel 5.18 dan Tabel 5.19.

Tabel 5.18 Kontrol Awal Gaya Geser Dasar

| Model | Geser dasar | Vt (respon spektrum) kN | 0,85xV (statik) kN | Kontrol |
|---------|-------------|-------------------------|--------------------|---------|
| Model 1 | Fx | 4733,161 | 4279,394 | OK |
| | Fy | 4247,919 | 4279,394 | NOT OK |
| Model 2 | Fx | 4383,563 | 4407,699 | NOT OK |
| | Fy | 4392,586 | 4407,699 | NOT OK |
| Model 3 | Fx | 4569,791 | 4528,119 | OK |
| | Fy | 4446,545 | 4528,119 | NOT OK |
| Model 4 | Fx | 4519,531 | 4431,912 | OK |
| | Fy | 4319,205 | 4431,912 | NOT OK |

Tabel 5.19 Kontrol Akhir Gaya Geser Dasar

| Model | Geser dasar | Skala faktor | Vt (respon spektrum) kN | 0,85xV (statik) kN |
|---------|-------------|--------------|-------------------------|--------------------|
| Model 1 | Fx | - | 4733,161 | 4279,394 |
| | Fy | 1,007 | 4279,394 | 4279,394 |
| Model 2 | Fx | 1,006 | 4396,969 | 4407,699 |
| | Fy | 1,003 | 4406,019 | 4407,699 |
| Model 3 | Fx | - | 4569,791 | 4528,119 |
| | Fy | 1,018 | 4528,119 | 4528,119 |
| Model 4 | Fx | - | 4519,531 | 4431,912 |
| | Fy | 1,026 | 4431,912 | 4431,912 |

5.3.2 Kontrol Partisipasi Massa

Analisis harus menyertakan jumlah mode yang cukup untuk mendapatkan partisipasi massa ragam terkombinasi sebesar paling sedikit 90% dari massa actual dalam masing-masing arah. Dari hasil analisis struktur dengan ETABS 2013 untuk semua model dapat dilihat pada Tabel 5.20 berikut.

Tabel 5.20 Partisipasi Massa

| Mode | Model 1 | | Model 2 | | Model 3 | | Model 4 | |
|------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| | Sum UX | Sum UY | Sum UX | Sum UY | Sum UX | Sum UY | Sum UX | Sum UY |
| 1 | 0,001 | 0,761 | 0,754 | 0,006 | 0,006 | 0,739 | 0,007 | 0,712 |
| 2 | 0,221 | 0,779 | 0,771 | 0,658 | 0,771 | 0,747 | 0,682 | 0,737 |
| 3 | 0,768 | 0,782 | 0,784 | 0,761 | 0,776 | 0,767 | 0,776 | 0,772 |
| 4 | 0,768 | 0,888 | 0,889 | 0,761 | 0,886 | 0,768 | 0,777 | 0,877 |
| 5 | 0,790 | 0,889 | 0,890 | 0,858 | 0,886 | 0,881 | 0,878 | 0,879 |
| 6 | 0,882 | 0,889 | 0,891 | 0,878 | 0,886 | 0,881 | 0,886 | 0,884 |
| 7 | 0,882 | 0,935 | 0,936 | 0,878 | 0,934 | 0,881 | 0,886 | 0,930 |
| 8 | 0,889 | 0,935 | 0,936 | 0,921 | 0,934 | 0,931 | 0,932 | 0,931 |
| 9 | 0,932 | 0,935 | 0,936 | 0,930 | 0,934 | 0,931 | 0,934 | 0,932 |
| 10 | 0,932 | 0,961 | 0,962 | 0,930 | 0,961 | 0,931 | 0,935 | 0,960 |
| 11 | 0,961 | 0,962 | 0,962 | 0,962 | 0,961 | 0,960 | 0,961 | 0,961 |
| 12 | 0,962 | 0,979 | 0,978 | 0,962 | 0,980 | 0,960 | 0,976 | 0,964 |
| 13 | 0,971 | 0,986 | 0,990 | 0,963 | 0,980 | 0,979 | 0,978 | 0,983 |
| 14 | 0,990 | 0,994 | 0,990 | 0,996 | 0,999 | 0,980 | 0,998 | 0,984 |
| 15 | 0,997 | 1,000 | 1,000 | 0,996 | 0,999 | 0,999 | 0,998 | 1,000 |

Berdasarkan Tabel 5.20 di atas menunjukkan syarat partisipasi massa terpenuhi mode shape 9 untuk model 1, dan pada mode shape 8 untuk model 2, model 3, dan model 4.

5.3.3 Kontrol Ketidakberaturan Struktur

1. Ketidakberaturan Horizontal
 - a. Ketidakberaturan Torsi

Torsi terdiri dari torsi bawaan dan torsi tak terduga. Pengaruh torsi bawaan terhadap struktur dapat dilihat pada besarnya eksentrisitas bawaan antara pusat massa dan pusat kekakuan. Jika pada struktur tidak mempunyai eksentrisitas, struktur tetap harus direncanakan mempunyai eksentrisitas tambahan minimal 5% dari lebar bentang arah yang ditinjau, disebut torsi tak terduga. Data pusat massa (X_{CM} dan Y_{CM}) serta pusat kekakuan (X_{CR} dan Y_{CR}) pada model 1 hingga model 4 ditabelkan pada Tabel 5.21 hingga Tabel 5.24. Sehingga dari nilai-nilai tersebut dapat diperoleh besarnya eksentrisitas bawaan (e_{0x} dan e_{0y}) sesuai dengan Persamaan (3.58) dan Persamaan (3.59).

Tabel 5.21 Eksentrisitas Bawaan Model 1

| Lantai | X_{cm} (Pusat Massa) m | X_{cr} (Pusat Kekakuan) m | e_{0x} (eksentrisitas bawaan) m | Y_{cm} (Pusat Massa) m | Y_{cr} (Pusat Kekakuan) m | e_{0y} (eksentrisitas bawaan) m |
|--------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| 9 | 23,841 | 23,1195 | 0,7219 | 21,305 | 20,4101 | 0,8956 |
| 8 | 23,837 | 23,1439 | 0,6934 | 21,268 | 20,4393 | 0,8287 |
| 7 | 23,837 | 23,1681 | 0,6692 | 21,268 | 20,4674 | 0,8006 |
| 6 | 23,837 | 23,1924 | 0,6449 | 21,268 | 20,4953 | 0,7727 |
| 5 | 23,837 | 23,2196 | 0,6177 | 21,268 | 20,5269 | 0,7411 |
| 4 | 23,837 | 23,2528 | 0,5845 | 21,268 | 20,5657 | 0,7023 |
| 3 | 23,837 | 23,2964 | 0,5409 | 21,268 | 20,6155 | 0,6525 |
| 2 | 23,837 | 23,3568 | 0,4805 | 21,268 | 20,6806 | 0,5874 |
| 1 | 23,837 | 23,4462 | 0,3911 | 21,268 | 20,7671 | 0,5009 |

Tabel 5.22 Eksentrisitas Bawaan Model 2

| Lantai | Xcm (Pusat Massa) m | Xcr (Pusat Kekakuan) m | e0x (eksintirisitas bawaan) m | Ycm (Pusat Massa) m | Ycr (Pusat Kekakuan) m | e0y (eksintirisitas bawaan) m |
|--------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| 9 | 23,877 | 23,0347 | 0,8426 | 21,284 | 20,5728 | 0,7113 |
| 8 | 23,852 | 23,0709 | 0,7817 | 21,258 | 20,5882 | 0,6707 |
| 7 | 23,852 | 23,1079 | 0,7447 | 21,258 | 20,6029 | 0,656 |
| 6 | 23,852 | 23,1447 | 0,7079 | 21,258 | 20,6177 | 0,6412 |
| 5 | 23,852 | 23,1851 | 0,6675 | 21,258 | 20,6345 | 0,6244 |
| 4 | 23,852 | 23,2328 | 0,6198 | 21,258 | 20,6554 | 0,6035 |
| 3 | 23,852 | 23,2915 | 0,5611 | 21,258 | 20,6835 | 0,5754 |
| 2 | 23,852 | 23,3654 | 0,4872 | 21,258 | 20,7235 | 0,5354 |
| 1 | 23,852 | 23,46 | 0,3926 | 21,258 | 20,7847 | 0,4742 |

Tabel 5.23 Eksentrisitas Bawaan Model 3

| Lantai | Xcm (Pusat Massa) m | Xcr (Pusat Kekakuan) m | e0x (eksintirisitas bawaan) m | Ycm (Pusat Massa) m | Ycr (Pusat Kekakuan) m | e0y (eksintirisitas bawaan) m |
|--------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| 9 | 23,890 | 23,180 | 0,711 | 21,281 | 20,800 | 0,481 |
| 8 | 23,858 | 23,265 | 0,593 | 21,257 | 20,866 | 0,391 |
| 7 | 23,858 | 23,352 | 0,506 | 21,257 | 20,932 | 0,326 |
| 6 | 23,858 | 23,441 | 0,417 | 21,257 | 21,000 | 0,258 |
| 5 | 23,858 | 23,543 | 0,315 | 21,257 | 21,081 | 0,176 |
| 4 | 23,858 | 23,671 | 0,187 | 21,257 | 21,187 | 0,070 |
| 3 | 23,858 | 23,837 | 0,021 | 21,257 | 21,331 | -0,074 |
| 2 | 23,858 | 24,055 | -0,197 | 21,257 | 21,530 | -0,273 |
| 1 | 23,858 | 24,327 | -0,469 | 21,257 | 21,789 | -0,531 |

Tabel 5.24 Eksentrisitas Bawaan Model 4

| Lantai | Xcm (Pusat Massa) m | Xcr (Pusat Kekakuan) m | e0x (eksintirisitas bawaan) m | Ycm (Pusat Massa) m | Ycr (Pusat Kekakuan) m | e0y (eksintirisitas bawaan) m |
|--------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| 9 | 23,860 | 23,081 | 0,779 | 21,294 | 20,496 | 0,798 |
| 8 | 23,845 | 23,111 | 0,734 | 21,263 | 20,517 | 0,746 |
| 7 | 23,845 | 23,141 | 0,705 | 21,263 | 20,537 | 0,726 |
| 6 | 23,845 | 23,170 | 0,675 | 21,263 | 20,558 | 0,705 |
| 5 | 23,845 | 23,203 | 0,642 | 21,263 | 20,581 | 0,682 |
| 4 | 23,845 | 23,243 | 0,602 | 21,263 | 20,610 | 0,653 |
| 3 | 23,845 | 23,295 | 0,551 | 21,263 | 20,648 | 0,615 |
| 2 | 23,845 | 23,362 | 0,484 | 21,263 | 20,701 | 0,562 |
| 1 | 23,845 | 23,454 | 0,392 | 21,263 | 20,775 | 0,488 |

Data eksentrisitas tak terduga sebesar 5% dari lebar bentang arah yang ditinjau sesuai dengan Persamaan (3.60) dan Persamaan (3.60) untuk semua model dapat dilihat pada Tabel 5.25.

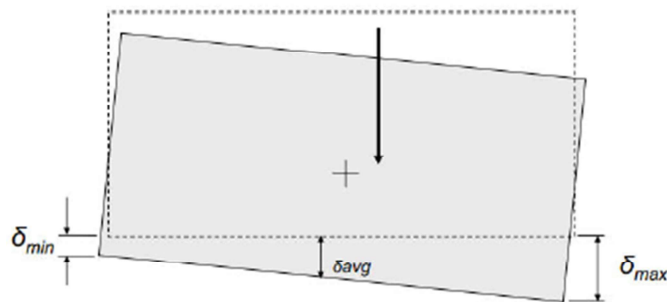
Tabel 5.25 Eksentrisitas Tak Terduga

| Lantai | Lx (bentang arah x) m | Ly (bentang arah y) m | e _{lx} (eksentrisitas tak terduga) m | e _{ly} (eksentrisitas tak terduga) m |
|--------|-----------------------|-----------------------|---|---|
| 9 | 54 | 46,8 | 2,7 | 2,34 |
| 8 | 54 | 46,8 | 2,7 | 2,34 |
| 7 | 54 | 46,8 | 2,7 | 2,34 |
| 6 | 54 | 46,8 | 2,7 | 2,34 |
| 5 | 54 | 46,8 | 2,7 | 2,34 |
| 4 | 54 | 46,8 | 2,7 | 2,34 |
| 3 | 54 | 46,8 | 2,7 | 2,34 |
| 2 | 54 | 46,8 | 2,7 | 2,34 |
| 1 | 54 | 46,8 | 2,7 | 2,34 |

Eksentrisitas tak terduga harus dikalikan faktor amplifikasi (A) sesuai dengan persyaratan sebagai berikut.

- Jika $\delta_{Max} < 1,2 \delta_{Avg}$, struktur tanpa ketidakberaturan torsi dan digunakan nilai $A = 1$
- Jika $\delta_{Max} > 1,2 \delta_{Avg}$, struktur dengan ketidakberaturan 1a dan digunakan nilai $A = \left(\frac{\delta_{Max}}{1,2 \times \delta_{Avg}} \right)^2$

Nilai δ_{Max} (simpangan maksimum) dan δ_{Avg} (simpangan rata-rata) diperoleh dari analisis ETABS 2013 seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5.15 berikut.



Gambar 5.15 Penentuan nilai δ_{Max} (simpangan maksimum) dan δ_{Avg} (simpangan rata-rata)

Sehingga hasil perhitungan nilai A dan kontrol ketidakberaturan torsi arah X dan arah Y untuk model 1 sampai model 4 dapat dilihat pada Tabel 5.26 sampai Tabel 5.33.

Tabel 5.26 Perhitungan Nilai A Dan Kontrol Ketidakberaturan Arah X Model 1

| Lantai | δ_{Max} (m) | δ_{Avg} (m) | $1,2 \delta_{Avg}$ (m) | Cek | Ax (pembesaran torsi) |
|--------|--------------------|--------------------|------------------------|-----------------|-----------------------|
| 9 | 0,038 | 0,037 | 0,044 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 8 | 0,035 | 0,035 | 0,041 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 7 | 0,032 | 0,032 | 0,038 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 6 | 0,029 | 0,028 | 0,034 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 5 | 0,024 | 0,023 | 0,028 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 4 | 0,019 | 0,018 | 0,022 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 3 | 0,013 | 0,013 | 0,015 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 2 | 0,007 | 0,007 | 0,008 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 1 | 0,002 | 0,002 | 0,003 | TIDAK ADA TORSI | 1 |

Tabel 5.27 Perhitungan Nilai A Dan Kontrol Ketidakberaturan Arah Y Model 1

| Lantai | δ_{Max} (m) | δ_{Avg} (m) | $1,2 \delta_{Avg}$ (m) | Cek | Ay (pembesaran torsi) |
|--------|--------------------|--------------------|------------------------|-----------------|-----------------------|
| 9 | 0,051 | 0,044 | 0,053 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 8 | 0,048 | 0,042 | 0,051 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 7 | 0,045 | 0,039 | 0,047 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 6 | 0,040 | 0,035 | 0,042 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 5 | 0,034 | 0,029 | 0,035 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 4 | 0,026 | 0,023 | 0,028 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 3 | 0,019 | 0,016 | 0,020 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 2 | 0,011 | 0,009 | 0,011 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 1 | 0,004 | 0,003 | 0,004 | TIDAK ADA TORSI | 1 |

Tabel 5.28 Perhitungan Nilai A Dan Kontrol Ketidakberaturan Arah X Model 2

| Lantai | δ_{Max} (m) | δ_{Avg} (m) | $1,2 \delta_{Avg}$ (m) | Cek | Ax (pembesaran torsi) |
|--------|--------------------|--------------------|------------------------|-----------------|--------------------------|
| 9 | 0,047 | 0,042 | 0,051 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 8 | 0,044 | 0,040 | 0,048 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 7 | 0,041 | 0,037 | 0,045 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 6 | 0,037 | 0,033 | 0,040 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 5 | 0,031 | 0,028 | 0,034 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 4 | 0,024 | 0,022 | 0,027 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 3 | 0,017 | 0,016 | 0,019 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 2 | 0,010 | 0,009 | 0,011 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 1 | 0,003 | 0,003 | 0,004 | TIDAK ADA TORSI | 1 |

Tabel 5.29 Perhitungan Nilai A Dan Kontrol Ketidakberaturan Arah Y Model 2

| Lantai | δ_{Max} (m) | δ_{Avg} (m) | $1,2 \delta_{Avg}$ (m) | Cek | Ay (pembesaran torsi) |
|--------|--------------------|--------------------|------------------------|-----------------|--------------------------|
| 9 | 0,048 | 0,042 | 0,050 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 8 | 0,045 | 0,039 | 0,047 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 7 | 0,041 | 0,035 | 0,042 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 6 | 0,036 | 0,031 | 0,037 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 5 | 0,030 | 0,026 | 0,031 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 4 | 0,023 | 0,020 | 0,024 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 3 | 0,016 | 0,014 | 0,017 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 2 | 0,009 | 0,008 | 0,009 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 1 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | TIDAK ADA TORSI | 1 |

Tabel 5.30 Perhitungan Nilai A Dan Kontrol Ketidakberaturan Arah X Model 3

| Lantai | δ_{Max} (m) | δ_{Avg} (m) | $1,2 \delta_{Avg}$ (m) | Cek | Ax (pembesaran torsi) |
|--------|--------------------|--------------------|------------------------|-----------------|-----------------------|
| 9 | 0,042 | 0,039 | 0,047 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 8 | 0,039 | 0,037 | 0,044 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 7 | 0,036 | 0,034 | 0,041 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 6 | 0,032 | 0,030 | 0,036 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 5 | 0,027 | 0,025 | 0,030 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 4 | 0,021 | 0,020 | 0,024 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 3 | 0,015 | 0,014 | 0,017 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 2 | 0,008 | 0,008 | 0,009 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 1 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | TIDAK ADA TORSI | 1 |

Tabel 5.31 Perhitungan Nilai A Dan Kontrol Ketidakberaturan Arah Y Model 3

| Lantai | δ_{Max} (m) | δ_{Avg} (m) | $1,2 \delta_{Avg}$ (m) | Cek | Ay (pembesaran torsi) |
|--------|--------------------|--------------------|------------------------|-----------------|-----------------------|
| 9 | 0,046 | 0,040 | 0,048 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 8 | 0,043 | 0,038 | 0,045 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 7 | 0,039 | 0,034 | 0,041 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 6 | 0,034 | 0,030 | 0,036 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 5 | 0,029 | 0,025 | 0,030 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 4 | 0,022 | 0,020 | 0,024 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 3 | 0,015 | 0,014 | 0,016 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 2 | 0,008 | 0,008 | 0,009 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 1 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | TIDAK ADA TORSI | 1 |

Tabel 5.32 Perhitungan Nilai A Dan Kontrol Ketidakberaturan Arah X Model 4

| Lantai | δ_{Max} (m) | δ_{Avg} (m) | $1,2 \delta_{Avg}$ (m) | Cek | Ax (pembesaran torsi) |
|--------|--------------------|--------------------|------------------------|-----------------|-----------------------|
| 9 | 0,044 | 0,040 | 0,048 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 8 | 0,042 | 0,038 | 0,045 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 7 | 0,038 | 0,035 | 0,042 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 6 | 0,034 | 0,031 | 0,037 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 5 | 0,029 | 0,026 | 0,031 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 4 | 0,022 | 0,020 | 0,024 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 3 | 0,016 | 0,014 | 0,017 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 2 | 0,009 | 0,008 | 0,010 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 1 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | TIDAK ADA TORSI | 1 |

Tabel 5.33 Perhitungan Nilai A Dan Kontrol Ketidakberaturan Arah Y Model 4

| Lantai | δ_{Max} (m) | δ_{Avg} (m) | $1,2 \delta_{Avg}$ (m) | Cek | Ay (pembesaran torsi) |
|--------|--------------------|--------------------|------------------------|-----------------|-----------------------|
| 9 | 0,050 | 0,043 | 0,052 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 8 | 0,047 | 0,041 | 0,049 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 7 | 0,043 | 0,038 | 0,045 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 6 | 0,038 | 0,033 | 0,040 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 5 | 0,032 | 0,028 | 0,033 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 4 | 0,025 | 0,022 | 0,026 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 3 | 0,018 | 0,015 | 0,018 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 2 | 0,010 | 0,009 | 0,010 | TIDAK ADA TORSI | 1 |
| 1 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | TIDAK ADA TORSI | 1 |

Dapat dilihat dari Tabel 5.26 sampai 5.33 bahwa struktur termasuk kedalam kategori tanpa ketidakberaturan torsi dengan faktor amplifikasi $A = 1$ sehingga dalam perhitungan eksentrisitas disain untuk semua model dengan menggunakan Persamaan (3.31) dan Persamaan (3.32) dapat dilihat pada Tabel 5.34 sampai Tabel 5.41.

Tabel 5.34 Eksentrisitas Disain Arah X Model 1

| Lantai | e0x (m) | e1x (m) | Ax | edx (m) |
|--------|---------|---------|----|---------|
| 9 | 0,722 | 2,7 | 1 | 3,422 |
| 8 | 0,693 | 2,7 | 1 | 3,393 |
| 7 | 0,669 | 2,7 | 1 | 3,369 |
| 6 | 0,645 | 2,7 | 1 | 3,345 |
| 5 | 0,618 | 2,7 | 1 | 3,318 |
| 4 | 0,584 | 2,7 | 1 | 3,285 |
| 3 | 0,541 | 2,7 | 1 | 3,241 |
| 2 | 0,480 | 2,7 | 1 | 3,181 |
| 1 | 0,391 | 2,7 | 1 | 3,091 |

Tabel 5.35 Eksentrisitas Disain Arah Y Model 1

| Lantai | e0y (m) | e1y (m) | Ay | edy (m) |
|--------|---------|---------|----|---------|
| 9 | 0,896 | 2,34 | 1 | 3,236 |
| 8 | 0,829 | 2,34 | 1 | 3,169 |
| 7 | 0,801 | 2,34 | 1 | 3,141 |
| 6 | 0,773 | 2,34 | 1 | 3,113 |
| 5 | 0,741 | 2,34 | 1 | 3,081 |
| 4 | 0,702 | 2,34 | 1 | 3,042 |
| 3 | 0,653 | 2,34 | 1 | 2,993 |
| 2 | 0,587 | 2,34 | 1 | 2,927 |
| 1 | 0,501 | 2,34 | 1 | 2,841 |

Tabel 5.36 Eksentrisitas Disain Arah X Model 2

| Lantai | e0x (m) | e1x (m) | Ax | edx (m) |
|--------|---------|---------|----|---------|
| 9 | 0,843 | 2,7 | 1 | 3,543 |
| 8 | 0,782 | 2,7 | 1 | 3,482 |
| 7 | 0,745 | 2,7 | 1 | 3,445 |
| 6 | 0,708 | 2,7 | 1 | 3,408 |
| 5 | 0,668 | 2,7 | 1 | 3,368 |
| 4 | 0,620 | 2,7 | 1 | 3,320 |
| 3 | 0,561 | 2,7 | 1 | 3,261 |
| 2 | 0,487 | 2,7 | 1 | 3,187 |
| 1 | 0,393 | 2,7 | 1 | 3,093 |

Tabel 5.37 Eksentrisitas Disain Arah Y Model 2

| Lantai | e0y (m) | e1y (m) | Ay | edy (m) |
|--------|---------|---------|----|---------|
| 9 | 0,711 | 2,34 | 1 | 3,051 |
| 8 | 0,671 | 2,34 | 1 | 3,011 |
| 7 | 0,656 | 2,34 | 1 | 2,996 |
| 6 | 0,641 | 2,34 | 1 | 2,981 |
| 5 | 0,624 | 2,34 | 1 | 2,964 |
| 4 | 0,604 | 2,34 | 1 | 2,944 |
| 3 | 0,575 | 2,34 | 1 | 2,915 |
| 2 | 0,535 | 2,34 | 1 | 2,875 |
| 1 | 0,474 | 2,34 | 1 | 2,814 |

Tabel 5.38 Eksentrisitas Disain Arah X Model 3

| Lantai | e0x (m) | e1x (m) | Ax | edx (m) |
|--------|---------|---------|----|---------|
| 9 | 0,711 | 2,7 | 1 | 3,411 |
| 8 | 0,593 | 2,7 | 1 | 3,293 |
| 7 | 0,506 | 2,7 | 1 | 3,206 |
| 6 | 0,417 | 2,7 | 1 | 3,117 |
| 5 | 0,315 | 2,7 | 1 | 3,015 |
| 4 | 0,187 | 2,7 | 1 | 2,887 |
| 3 | 0,021 | 2,7 | 1 | 2,721 |
| 2 | -0,197 | 2,7 | 1 | 2,503 |
| 1 | -0,469 | 2,7 | 1 | 2,231 |

Tabel 5.39 Eksentrisitas Disain Arah Y Model 3

| Lantai | e0y (m) | e1y (m) | Ay | edy (m) |
|--------|---------|---------|----|---------|
| 9 | 0,481 | 2,34 | 1 | 2,8209 |
| 8 | 0,391 | 2,34 | 1 | 2,7314 |
| 7 | 0,326 | 2,34 | 1 | 2,6656 |
| 6 | 0,258 | 2,34 | 1 | 2,5975 |
| 5 | 0,176 | 2,34 | 1 | 2,5161 |
| 4 | 0,070 | 2,34 | 1 | 2,4102 |
| 3 | -0,074 | 2,34 | 1 | 2,2661 |
| 2 | -0,273 | 2,34 | 1 | 2,0673 |
| 1 | -0,531 | 2,34 | 1 | 1,8088 |

Tabel 5.40 Eksentrisitas Disain Arah X Model 4

| Lantai | e0x (m) | e1x (m) | Ax | edx (m) |
|--------|---------|---------|----|---------|
| 9 | 0,779 | 2,7 | 1 | 3,479 |
| 8 | 0,734 | 2,7 | 1 | 3,434 |
| 7 | 0,705 | 2,7 | 1 | 3,405 |
| 6 | 0,675 | 2,7 | 1 | 3,375 |
| 5 | 0,642 | 2,7 | 1 | 3,342 |
| 4 | 0,602 | 2,7 | 1 | 3,302 |
| 3 | 0,551 | 2,7 | 1 | 3,251 |
| 2 | 0,484 | 2,7 | 1 | 3,184 |
| 1 | 0,392 | 2,7 | 1 | 3,092 |

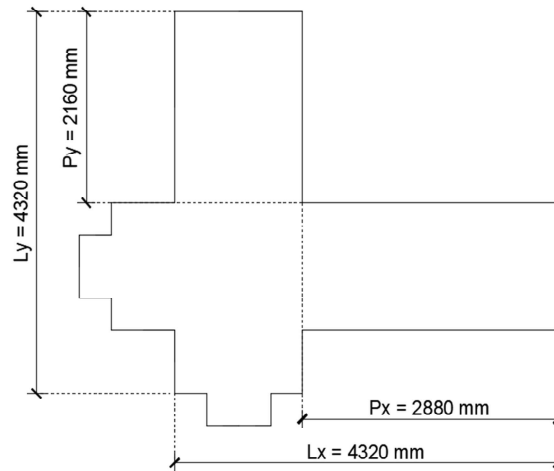
Tabel 5.41 Eksentrisitas Disain Arah Y Model 4

| Lantai | e0y (m) | e1y (m) | Ay | edy (m) |
|--------|---------|---------|----|---------|
| 9 | 0,798 | 2,34 | 1 | 3,138 |
| 8 | 0,746 | 2,34 | 1 | 3,086 |
| 7 | 0,726 | 2,34 | 1 | 3,066 |
| 6 | 0,705 | 2,34 | 1 | 3,045 |
| 5 | 0,682 | 2,34 | 1 | 3,022 |
| 4 | 0,653 | 2,34 | 1 | 2,993 |
| 3 | 0,615 | 2,34 | 1 | 2,955 |
| 2 | 0,562 | 2,34 | 1 | 2,902 |
| 1 | 0,488 | 2,34 | 1 | 2,828 |

Selanjutnya nilai eksentrisitas tak terduga dengan pembesaran torsi ($e1 \times A$) dimasukkan saat pendefinisian beban gempa respon spektrum, karena pada ETABS 2013 sudah menghitung eksentrisitas bawaan ($e0$) yaitu selisih antara pusat massa dan pusat kekakuan tiap lantai secara otomatis.

b. Ketidakberaturan Sudut Dalam

Ketidakberaturan sudut dalam didefinisikan ada jika kedua proyeksi denah struktur dari sudut dalam lebih besar dari 15 persen dimensi denah struktur dalam arah yang ditentukan. Dimensi denah secara keseluruhan dapat digambarkan pada Gambar 5.16 berikut.



Gambar 5.16 Dimensi denah secara keseluruhan

Untuk mengetahui ketidakberaturan sudut dalam pada struktur dapat digunakan persamaan sebagai berikut.

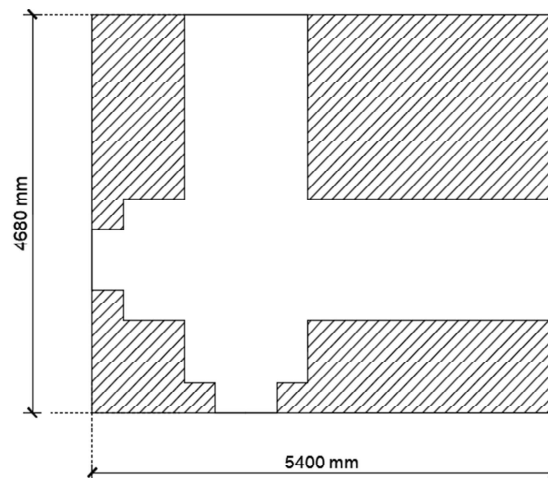
$$\frac{P_x}{L_x} = \frac{2880}{4320} = 0,667 > 0,15$$

$$\frac{P_y}{L_y} = \frac{2160}{4320} = 0,5 > 0,15$$

Dari hasil perhitungan diatas diperoleh nilai kedua proyeksi denah struktur dari sudut dalam lebih besar dari 15 persen dimensi denah struktur dalam arah yang ditentukan yang berarti bahwa struktur memiliki ketidakberaturan sudut dalam.

c. Ketidakberaturan Diskontinuitas Diafragma

Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma didefinisikan ada jika hasil dari perbandingan luasan diafragma bruto dengan luasan diafragma bukaan kurang dari 50 persen. luasan denah secara keseluruhan dapat digambarkan pada Gambar 5.17 berikut.



Gambar 5.17 Dimensi denah secara keseluruhan

Untuk mengetahui ketidakberaturan diskontinuitas diafragma pada struktur dapat digunakan persamaan sebagai berikut.

$$\text{Luasan keseluruhan (Ab)} = 25272000 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luasan bukaan (An)} = 13348800 \text{ mm}^2$$

$$\frac{An}{Ab} \times 100\% = \frac{13348800}{25272000} \times 100\% = 52,8\% > 50\%$$

Dari hasil perhitungan diatas diperoleh hasil dari perbandingan luasan diafragma bruto dengan luasan diafragma bukaan lebih dari 50 persen yang berarti bahwa struktur memiliki ketidakberaturan diskontinuitas diafragma.

d. Ketidakberaturan Pergeseran Melintang Terhadap Bidang

Ketidakberaturan didefinisikan ada jika terdapat diskontinuitas dalam lintasan tahanan gaya lateral, seperti pergeseran melintang terhadap bidang elemen vertikal. Gaya-gaya pada struktur dalam penelitian ini mengarah sesuai dengan fungsinya sehingga tidak terjadi ketidakberaturan pergeseran melintang.

e. Ketidakberaturan Sistem Nonpararel

Ketidakberaturan didefinisikan ada jika elemen penahan gaya lateral vertikal tidak paralel atau simetris terhadap sumbu-sumbu orthogonal utama sistem penahan gaya gempa. Elemen penahan gaya lateral vertikal pada struktur dalam penelitian ini hanya berupa kolom dan diletakan secara simetris untuk semua model sehingga tidak terjadi ketidakberaturan sistem nonpararel.

2. Ketidakberaturan Vertikal

a. Ketidakberaturan Tingkat Lunak

Jika terdapat suatu tingkat dimana kekakuan lateralnya kurang dari 70% kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang 80% kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya, maka struktur tersebut memiliki ketidakberaturan tingkat lunak. Jika terdapat suatu tingkat dimana kekakuan lateralnya kurang dari 60% kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang 70% kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya, maka struktur tersebut memiliki ketidakberaturan tingkat lunak berlebihan. Pemeriksaan ketidakberaturan tingkat lunak dan tingkat lunak berlebih pada semua model dapat dilihat pada Tabel 5.42 sampai Tabel 5.45.

Tabel 5.42 Prosentase Kekakuan Lateral Model 1

| Lantai | Kx (kN/m) | Ky (kN/m) | Prosentase X (%) | Prosentase Y (%) |
|--------|------------|------------|------------------|------------------|
| 9 | 505049,83 | 454123,49 | 100,00% | 100,00% |
| 8 | 836003,21 | 681406,64 | 165,53% | 150,05% |
| 7 | 908477,19 | 712623,86 | 108,67% | 104,58% |
| 6 | 926023,60 | 709399,92 | 101,93% | 99,55% |
| 5 | 941997,99 | 707695,03 | 101,73% | 99,76% |
| 4 | 986405,26 | 725635,74 | 104,71% | 102,54% |
| 3 | 1095258,95 | 783878,67 | 111,04% | 108,03% |
| 2 | 1388017,45 | 956852,82 | 126,73% | 122,07% |
| 1 | 2873880,83 | 1900820,70 | 207,05% | 198,65% |

Tabel 5.43 Prosentase Kekakuan Lateral Model 2

| Lantai | Kx (kN/m) | Ky (kN/m) | Prosentase X (%) | Prosentase Y (%) |
|--------|------------|------------|------------------|------------------|
| 9 | 499040,97 | 392871,01 | 100,00% | 100,00% |
| 8 | 737325,95 | 655771,34 | 147,75% | 166,92% |
| 7 | 770008,72 | 715780,24 | 104,43% | 109,15% |
| 6 | 765566,00 | 733933,95 | 99,42% | 102,54% |
| 5 | 763762,60 | 750013,01 | 99,76% | 102,19% |
| 4 | 781215,94 | 794081,86 | 102,29% | 105,88% |
| 3 | 839639,29 | 896820,05 | 107,48% | 112,94% |
| 2 | 1017225,51 | 1161973,02 | 121,15% | 129,57% |
| 1 | 2001666,89 | 2462290,81 | 196,78% | 211,91% |

Tabel 5.44 Prosentase Kekakuan Lateral Model 3

| Lantai | Kx (kN/m) | Ky (kN/m) | Prosentase X (%) | Prosentase Y (%) |
|--------|------------|------------|------------------|------------------|
| 9 | 495557,70 | 430355,57 | 100,00% | 100,00% |
| 8 | 771640,16 | 689567,47 | 155,71% | 160,23% |
| 7 | 820767,29 | 746418,16 | 106,37% | 108,24% |
| 6 | 825250,73 | 756454,94 | 100,55% | 101,34% |
| 5 | 829968,53 | 767601,27 | 100,57% | 101,47% |
| 4 | 858837,00 | 805484,98 | 103,48% | 104,94% |
| 3 | 939231,41 | 900327,77 | 109,36% | 111,77% |
| 2 | 1165460,04 | 1151092,58 | 124,09% | 127,85% |
| 1 | 2356253,98 | 2405317,55 | 202,17% | 208,96% |

Tabel 5.45 Prosentase Kekakuan Lateral Model 4

| Lantai | Kx (kN/m) | Ky (kN/m) | Prosentase X (%) | Prosentase Y (%) |
|--------|------------|------------|------------------|------------------|
| 9 | 497581,80 | 422825,77 | 100,00% | 100,00% |
| 8 | 766642,89 | 673624,97 | 154,07% | 159,32% |
| 7 | 816540,94 | 717236,90 | 106,51% | 106,47% |
| 6 | 819527,91 | 724210,80 | 100,37% | 100,97% |
| 5 | 825221,29 | 728363,30 | 100,69% | 100,57% |
| 4 | 853399,24 | 758991,26 | 103,41% | 104,21% |
| 3 | 934482,45 | 837160,97 | 109,50% | 110,30% |
| 2 | 1161733,65 | 1053421,47 | 124,32% | 125,83% |
| 1 | 2354805,25 | 2168778,37 | 202,70% | 205,88% |

Dapat dilihat dari Tabel 5.42 sampai 5.45 diatas terlihat bahwa nilai prosentase kekakuan lateral seluruh model lebih dari 80% baik pada arah x serta arah y, sehingga struktur tidak diklasifikasikan dalam ketidakberaturan tingkat lunak dan tingkat lunak berlebih.

b. Ketidakberaturan Berat dan Massa

Ketidakberaturan ini pada struktur jika massa efektif semua tingkat lebih dari 150% massa efektif tingkat didekatnya. Atap yang lebih ringan dari lantai di bawahnya tidak perlu ditinjau. Pemeriksaan ketidakberaturan berat dan massa pada semua model dapat dilihat pada Tabel 5.46 sampai Tabel 5.49.

Tabel 5.46 Prosentase Berat Model 1

| Lantai | Berat per lantai (kN) | Prosentase berat | |
|--------|-----------------------|------------------|----------|
| | | di atas | di bawah |
| 9 | 9234,246 | 100,0% | 100,0% |
| 8 | 15734,2 | 170,4% | 58,7% |
| 7 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 6 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 5 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 4 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 3 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 2 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 1 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |

Tabel 5.47 Prosentase Berat Model 2

| Lantai | Berat per lantai (kN) | Prosentase berat | |
|--------|-----------------------|------------------|----------|
| | | di atas | di bawah |
| 9 | 9234,246 | 100,0% | 100,0% |
| 8 | 15734,2 | 170,4% | 58,7% |
| 7 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 6 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 5 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 4 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 3 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 2 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |

Tabel 5.48 Prosentase Berat Model 3

| Lantai | Berat per lantai (kN) | Prosentase berat | |
|--------|-----------------------|------------------|----------|
| | | di atas | di bawah |
| 9 | 9234,246 | 100,0% | 100,0% |
| 8 | 15734,2 | 170,4% | 58,7% |
| 7 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 6 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 5 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 4 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 3 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 2 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 1 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |

Tabel 5.49 Prosentase Berat Model 4

| Lantai | Berat per lantai (kN) | Prosentase berat | |
|--------|-----------------------|------------------|----------|
| | | di atas | di bawah |
| 9 | 9234,246 | 100,0% | 100,0% |
| 8 | 15734,2 | 170,4% | 58,7% |
| 7 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 6 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 5 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 4 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 3 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 2 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |
| 1 | 15734,2 | 100,0% | 100,0% |

Dapat dilihat dari Tabel 5.46 sampai 5.49 diatas terlihat bahwa nilai prosentase berat tiap lantai pada stemua model masih dibawah dari 150% dari lantai terdekat kecuali pada lantai atap, sehingga struktur tidak diklasifikasikan dalam ketidakberaturan berat dan massa.

c. Ketidakberaturan Geometri Vertikal

Ketidakberaturan ini terdapat pada struktur jika dimensi horizontal sistem penahan gaya gempa disemua tingkat lebih dari 130% dimensi horizontal sistem penahan gaya gempa tingkat di dekatnya. Struktur dalam penelitian ini memiliki bentuk struktur tiap lantai yang sama, sehingga struktur tidak diklasifikasikan dalam ketidakberaturan geometri vertikal.

d. Ketidakberaturan Diskontinuitas Arah Bidang Dalam Ketidakberaturan Elemen Penahan Gaya Lateral Vertikal

Struktur dalam penelitian ini tidak terdapat pergeseran (*offset*) elemen penahan yang lebih besar dari panjang elemen tersebut. sehingga struktur ini memenuhi persyaratan untuk bangunan diskontinuitas arah bidang.

e. Diskontinuitas dalam Ketidakberaturan Kuat Lateral Tingkat

Diskontinuitas dalam ketidakberaturan kuat lateral tingkat ada bila kuat lateral sembarang tingkat kurang dari 80% kuat tingkat di atasnya. Sedangkan diskontinuitas dalam ketidakberaturan kuat lateral tingkat berlebihan ada bila kuat lateral sembarang tingkat kurang dari 65% kuat tingkat di atasnya. Pemeriksaan diskontinuitas dalam ketidakberaturan kuat lateral tingkat pada semua model dapat dilihat pada Tabel 5.50 sampai Tabel 5.53.

Tabel 5.50 Prosentase Kekuatan Lateral Model 1

| Lantai | V _x (kN/m) | V _y (kN/m) | Prosentase X (%) | Prosentase Y (%) |
|--------|-----------------------|-----------------------|------------------|------------------|
| 9 | 840,05 | 800,53 | 100,00% | 100,00% |
| 8 | 1820,35 | 1691,43 | 216,70% | 211,29% |
| 7 | 2503,64 | 2301,34 | 137,54% | 136,06% |
| 6 | 3040,32 | 2747,04 | 121,44% | 119,37% |
| 5 | 3487,75 | 3110,01 | 114,72% | 113,21% |
| 4 | 3897,91 | 3460,99 | 111,76% | 111,29% |
| 3 | 4274,10 | 3809,11 | 109,65% | 110,06% |
| 2 | 4576,14 | 4110,65 | 107,07% | 107,92% |
| 1 | 4733,16 | 4279,39 | 103,43% | 104,10% |

Tabel 5.51 Prosentase Kekuatan Lateral Model 2

| Lantai | Vx (kN/m) | Vy (kN/m) | Prosentase X (%) | Prosentase Y (%) |
|--------|-----------|-----------|------------------|------------------|
| 9 | 811,68 | 829,39 | 100,00% | 100,00% |
| 8 | 1715,32 | 1753,64 | 211,33% | 211,44% |
| 7 | 2352,09 | 2358,49 | 137,12% | 134,49% |
| 6 | 2819,52 | 2825,49 | 119,87% | 119,80% |
| 5 | 3204,80 | 3209,56 | 113,66% | 113,59% |
| 4 | 3569,95 | 3582,26 | 111,39% | 111,61% |
| 3 | 3925,16 | 3943,33 | 109,95% | 110,08% |
| 2 | 4229,39 | 4246,96 | 107,75% | 107,70% |
| 1 | 4396,97 | 4406,02 | 103,96% | 103,75% |

Tabel 5.52 Prosentase Kekuatan Lateral Model 3

| Lantai | Vx (kN/m) | Vy (kN/m) | Prosentase X (%) | Prosentase Y (%) |
|--------|-----------|-----------|------------------|------------------|
| 9 | 836,94 | 869,81 | 100,00% | 100,00% |
| 8 | 1779,84 | 1804,57 | 212,66% | 207,47% |
| 7 | 2436,74 | 2438,86 | 136,91% | 135,15% |
| 6 | 2932,87 | 2908,89 | 120,36% | 119,27% |
| 5 | 3341,80 | 3300,83 | 113,94% | 113,47% |
| 4 | 3728,23 | 3678,59 | 111,56% | 111,44% |
| 3 | 4097,74 | 4048,42 | 109,91% | 110,05% |
| 2 | 4404,66 | 4360,37 | 107,49% | 107,71% |
| 1 | 4569,79 | 4528,12 | 103,75% | 103,85% |

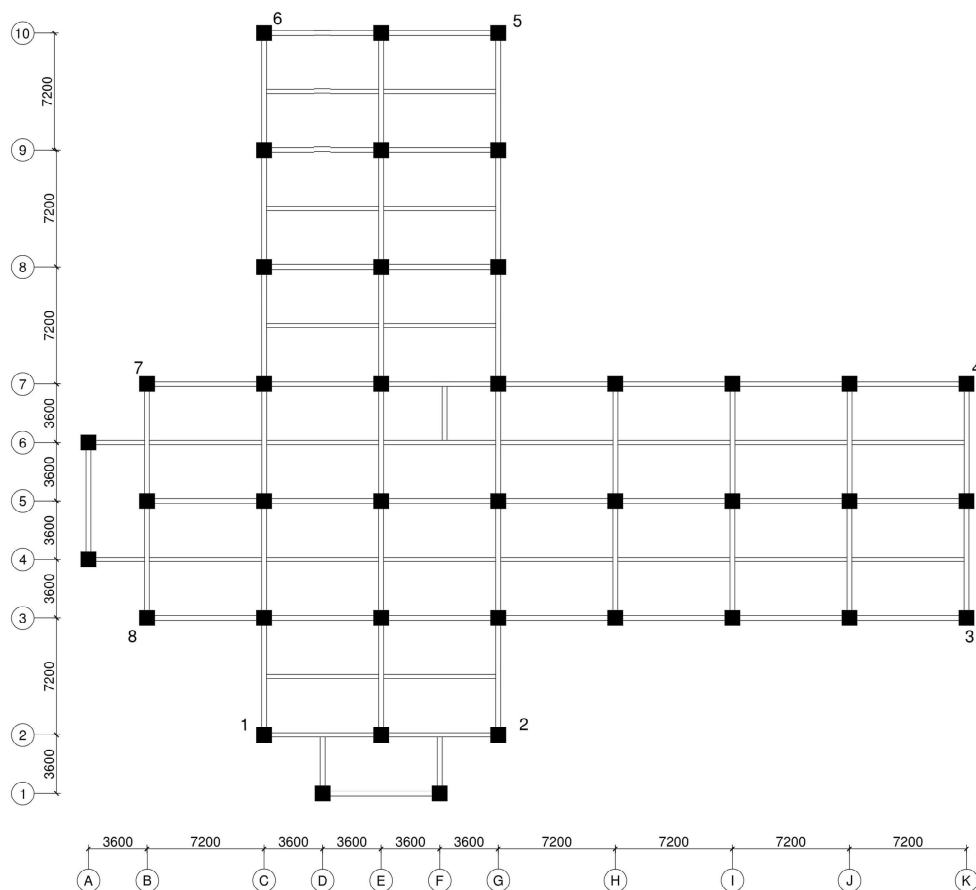
Tabel 5.53 Prosentase Kekuatan Lateral Model 4

| Lantai | Vx (kN/m) | Vy (kN/m) | Prosentase X (%) | Prosentase Y (%) |
|--------|-----------|-----------|------------------|------------------|
| 9 | 832,47 | 829,02 | 100,00% | 100,00% |
| 8 | 1752,36 | 1760,15 | 210,50% | 212,32% |
| 7 | 2406,87 | 2376,85 | 137,35% | 135,04% |
| 6 | 2896,93 | 2848,44 | 120,36% | 119,84% |
| 5 | 3309,05 | 3225,18 | 114,23% | 113,23% |
| 4 | 3690,00 | 3600,54 | 111,51% | 111,64% |
| 3 | 4057,19 | 3958,21 | 109,95% | 109,93% |
| 2 | 4360,34 | 4263,34 | 107,47% | 107,71% |
| 1 | 4519,53 | 4431,91 | 103,65% | 103,95% |

Dapat dilihat dari Tabel 5.26 sampai 5.33 diatas terlihat bahwa nilai prosentase kekuatan lateral tiap lantai pada semuanya model nilainya dibawah dari 80% dari tingkat diatasny, sehingga struktur tidak diklasifikasikan .

5.3.4 Kontrol Simpangan antar Lantai

Dilakukan kontrol simpangan antar lantai pada struktur yang nilainya tidak boleh melebihi simpangan antar lantai tingkat ijin, adapun *joint* yang dikontrol simpangan antar lantai sebanyak 8 titik. Letak *joint* yang ditinjau pada model 1 dapat dilihat pada Gambar 5.18 dan sama letaknya untuk model lainnya.



Gambar 5.18 Letak Joint yang Dikontrol Simpangan Antar Lantainya

Simpangan antar lantai merupakan selisih antara perpindahan yang diperbesar pada lantai yang ditinjau dengan lantai dibawahnya. Perpindahan pada titik yang ditinjau dipeoleh dari hasil analisis ETABS 2013 untuk semua model dapat dilihat pada Tabel 5.54 sampai Tabel 5.61.

Tabel 5.54 Perpindahan Arah X Model 1

| Lantai | δ_{ey} (simpangan arah Y pada titik yang ditinjau) mm | | | | | | | |
|--------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 9 | 41,70 | 41,70 | 37,40 | 34,80 | 46,50 | 46,50 | 34,80 | 37,40 |
| 8 | 39,40 | 39,40 | 35,30 | 32,70 | 43,80 | 43,80 | 32,70 | 35,30 |
| 7 | 36,20 | 36,20 | 32,40 | 30,00 | 40,20 | 40,20 | 30,00 | 32,40 |
| 6 | 32,00 | 32,00 | 28,60 | 26,50 | 35,50 | 35,50 | 26,50 | 28,60 |
| 5 | 26,90 | 26,90 | 24,00 | 22,20 | 29,90 | 29,90 | 22,20 | 24,00 |
| 4 | 21,00 | 21,00 | 18,80 | 17,30 | 23,30 | 23,30 | 17,30 | 18,80 |
| 3 | 14,60 | 14,60 | 13,00 | 12,00 | 16,20 | 16,20 | 12,00 | 13,00 |
| 2 | 8,20 | 8,20 | 7,30 | 6,70 | 9,10 | 9,10 | 6,70 | 7,30 |
| 1 | 2,70 | 2,70 | 2,40 | 2,20 | 3,00 | 3,00 | 2,20 | 2,40 |

Tabel 5.55 Perpindahan Arah Y Model 1

| Lantai | δ_{ey} (simpangan arah Y pada titik yang ditinjau) mm | | | | | | | |
|--------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 9 | 42,30 | 39,90 | 61,60 | 61,60 | 39,90 | 42,30 | 44,50 | 44,50 |
| 8 | 40,20 | 38,00 | 58,40 | 58,40 | 38,00 | 40,20 | 42,30 | 42,30 |
| 7 | 37,30 | 35,10 | 54,00 | 54,00 | 35,10 | 37,30 | 39,20 | 39,20 |
| 6 | 33,30 | 31,30 | 48,00 | 48,00 | 31,30 | 33,30 | 35,00 | 35,00 |
| 5 | 28,30 | 26,50 | 40,70 | 40,70 | 26,50 | 28,30 | 29,80 | 29,80 |
| 4 | 22,40 | 21,00 | 32,10 | 32,10 | 21,00 | 22,40 | 23,60 | 23,60 |
| 3 | 15,90 | 14,90 | 22,60 | 22,60 | 14,90 | 15,90 | 16,70 | 16,70 |
| 2 | 9,10 | 8,60 | 12,90 | 12,90 | 8,60 | 9,10 | 9,60 | 9,60 |
| 1 | 3,10 | 2,90 | 4,40 | 4,40 | 2,90 | 3,10 | 3,30 | 3,30 |

Tabel 5.56 Perpindahan Arah X Model 2

| Lantai | δ_{ex} (simpangan arah X pada titik yang ditinjau) mm | | | | | | | |
|--------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 9 | 43,50 | 43,50 | 41,00 | 40,40 | 55,40 | 55,40 | 40,40 | 41,00 |
| 8 | 41,40 | 41,40 | 39,10 | 38,50 | 52,60 | 52,60 | 38,50 | 39,10 |
| 7 | 38,40 | 38,40 | 36,20 | 35,60 | 48,60 | 48,60 | 35,60 | 36,20 |
| 6 | 34,30 | 34,30 | 32,30 | 31,80 | 43,30 | 43,30 | 31,80 | 32,30 |
| 5 | 29,10 | 29,10 | 27,50 | 27,00 | 36,70 | 36,70 | 27,00 | 27,50 |
| 4 | 23,10 | 23,10 | 21,80 | 21,40 | 28,90 | 28,90 | 21,40 | 21,80 |
| 3 | 16,40 | 16,40 | 15,50 | 15,20 | 20,40 | 20,40 | 15,20 | 15,50 |
| 2 | 9,40 | 9,40 | 8,90 | 8,70 | 11,70 | 11,70 | 8,70 | 8,90 |
| 1 | 3,30 | 3,30 | 3,10 | 3,00 | 4,00 | 4,00 | 3,00 | 3,10 |

Tabel 5.57 Perpindahan arah Y Model 2

| Lantai | δ_{ey} (simpangan arah Y pada titik yang ditinjau) mm | | | | | | | |
|--------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 9 | 39,20 | 37,40 | 59,10 | 59,10 | 37,40 | 39,20 | 41,80 | 41,80 |
| 8 | 36,70 | 35,00 | 55,40 | 55,40 | 35,00 | 36,70 | 39,20 | 39,20 |
| 7 | 33,50 | 31,80 | 50,60 | 50,60 | 31,80 | 33,50 | 35,80 | 35,80 |
| 6 | 29,40 | 27,90 | 44,50 | 44,50 | 27,90 | 29,40 | 31,50 | 31,50 |
| 5 | 24,60 | 23,20 | 37,20 | 37,20 | 23,20 | 24,60 | 26,40 | 26,40 |
| 4 | 19,00 | 18,00 | 28,90 | 28,90 | 18,00 | 19,00 | 20,50 | 20,50 |
| 3 | 13,10 | 12,30 | 19,90 | 19,90 | 12,30 | 13,10 | 14,10 | 14,10 |
| 2 | 7,30 | 6,80 | 11,10 | 11,10 | 6,80 | 7,30 | 7,90 | 7,90 |
| 1 | 2,40 | 2,20 | 3,60 | 3,60 | 2,20 | 2,40 | 2,60 | 2,60 |

Tabel 5.58 Perpindahan Arah X Model 3

| Lantai | δ_{ex} (simpangan arah X pada titik yang ditinjau) mm | | | | | | | |
|--------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 9 | 41,50 | 41,50 | 39,40 | 38,40 | 48,80 | 48,80 | 38,40 | 39,40 |
| 8 | 39,40 | 39,40 | 37,30 | 36,30 | 46,00 | 46,00 | 36,30 | 37,30 |
| 7 | 36,30 | 36,30 | 34,40 | 33,50 | 42,20 | 42,20 | 33,50 | 34,40 |
| 6 | 32,30 | 32,30 | 30,60 | 29,70 | 37,40 | 37,40 | 29,70 | 30,60 |
| 5 | 27,30 | 27,30 | 25,90 | 25,00 | 31,40 | 31,40 | 25,00 | 25,90 |
| 4 | 21,50 | 21,50 | 20,30 | 19,60 | 24,50 | 24,50 | 19,60 | 20,30 |
| 3 | 15,10 | 15,10 | 14,30 | 13,70 | 17,10 | 17,10 | 13,70 | 14,30 |
| 2 | 8,60 | 8,60 | 8,10 | 7,80 | 9,60 | 9,60 | 7,80 | 8,10 |
| 1 | 2,90 | 2,90 | 2,80 | 2,60 | 3,20 | 3,20 | 2,60 | 2,80 |

Tabel 5.59 Perpindahan Arah Y Model 3

| Lantai | δ_{ey} (simpangan arah Y pada titik yang ditinjau) mm | | | | | | | |
|--------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 9 | 39,30 | 38,40 | 55,20 | 55,20 | 38,40 | 39,30 | 40,70 | 40,70 |
| 8 | 37,00 | 36,00 | 51,70 | 51,70 | 36,00 | 37,00 | 38,30 | 38,30 |
| 7 | 34,00 | 32,90 | 47,20 | 47,20 | 32,90 | 34,00 | 35,20 | 35,20 |
| 6 | 30,00 | 29,00 | 41,50 | 41,50 | 29,00 | 30,00 | 31,10 | 31,10 |
| 5 | 25,20 | 24,30 | 34,60 | 34,60 | 24,30 | 25,20 | 26,20 | 26,20 |
| 4 | 19,70 | 18,90 | 26,80 | 26,80 | 18,90 | 19,70 | 20,40 | 20,40 |
| 3 | 13,70 | 13,00 | 18,40 | 18,40 | 13,00 | 13,70 | 14,20 | 14,20 |
| 2 | 7,70 | 7,30 | 10,20 | 10,20 | 7,30 | 7,70 | 8,00 | 8,00 |
| 1 | 2,60 | 2,40 | 3,40 | 3,40 | 2,40 | 2,60 | 2,70 | 2,70 |

Tabel 5.60 Perpindahan Arah X Model 4

| Lantai | δ_{ex} (simpangan arah X pada titik yang ditinjau) mm | | | | | | | |
|--------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 9 | 41,30 | 41,30 | 38,40 | 38,10 | 52,80 | 52,80 | 38,10 | 38,40 |
| 8 | 39,10 | 39,10 | 36,40 | 36,00 | 49,90 | 49,90 | 36,00 | 36,40 |
| 7 | 36,10 | 36,10 | 33,60 | 33,20 | 46,00 | 46,00 | 33,20 | 33,60 |
| 6 | 32,10 | 32,10 | 29,80 | 29,50 | 40,90 | 40,90 | 29,50 | 29,80 |
| 5 | 27,20 | 27,20 | 25,20 | 24,90 | 34,50 | 34,50 | 24,90 | 25,20 |
| 4 | 21,40 | 21,40 | 19,80 | 19,60 | 27,10 | 27,10 | 19,60 | 19,80 |
| 3 | 15,00 | 15,00 | 13,90 | 13,70 | 19,00 | 19,00 | 13,70 | 13,90 |
| 2 | 8,50 | 8,50 | 7,90 | 7,80 | 10,70 | 10,70 | 7,80 | 7,90 |
| 1 | 2,90 | 2,90 | 2,70 | 2,60 | 3,60 | 3,60 | 2,60 | 2,70 |

Tabel 5.61 Perpindahan Arah Y Model 4

| Lantai | δ_{ey} (simpangan arah Y pada titik yang ditinjau) mm | | | | | | | |
|--------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 9 | 41,00 | 39,10 | 61,00 | 61,00 | 39,10 | 41,00 | 43,20 | 43,20 |
| 8 | 38,70 | 36,80 | 57,60 | 57,60 | 36,80 | 38,70 | 40,90 | 40,90 |
| 7 | 35,60 | 33,80 | 53,00 | 53,00 | 33,80 | 35,60 | 37,60 | 37,60 |
| 6 | 31,60 | 29,90 | 46,90 | 46,90 | 29,90 | 31,60 | 33,40 | 33,40 |
| 5 | 26,60 | 25,20 | 39,50 | 39,50 | 25,20 | 26,60 | 28,20 | 28,20 |
| 4 | 20,90 | 19,70 | 31,00 | 31,00 | 19,70 | 20,90 | 22,10 | 22,10 |
| 3 | 14,60 | 13,70 | 21,60 | 21,60 | 13,70 | 14,60 | 15,50 | 15,50 |
| 2 | 8,20 | 7,70 | 12,20 | 12,20 | 7,70 | 8,20 | 8,70 | 8,70 |
| 1 | 2,80 | 2,60 | 4,10 | 4,10 | 2,60 | 2,80 | 2,90 | 2,90 |

Dibawah ini dicontohkan perhitungan simpangan antar lantai arah X pada joint 1 lantai 2 model 1 menggunakan Persamaan (3.67).

$$\begin{aligned}\delta_2 &= \frac{(\delta_{ex2} - \delta_{ex1}) \times C_d}{I_e} \\ &= \frac{(8,2 - 2,7) \times 5,5}{1} \\ &= 30,25 \text{ mm}\end{aligned}$$

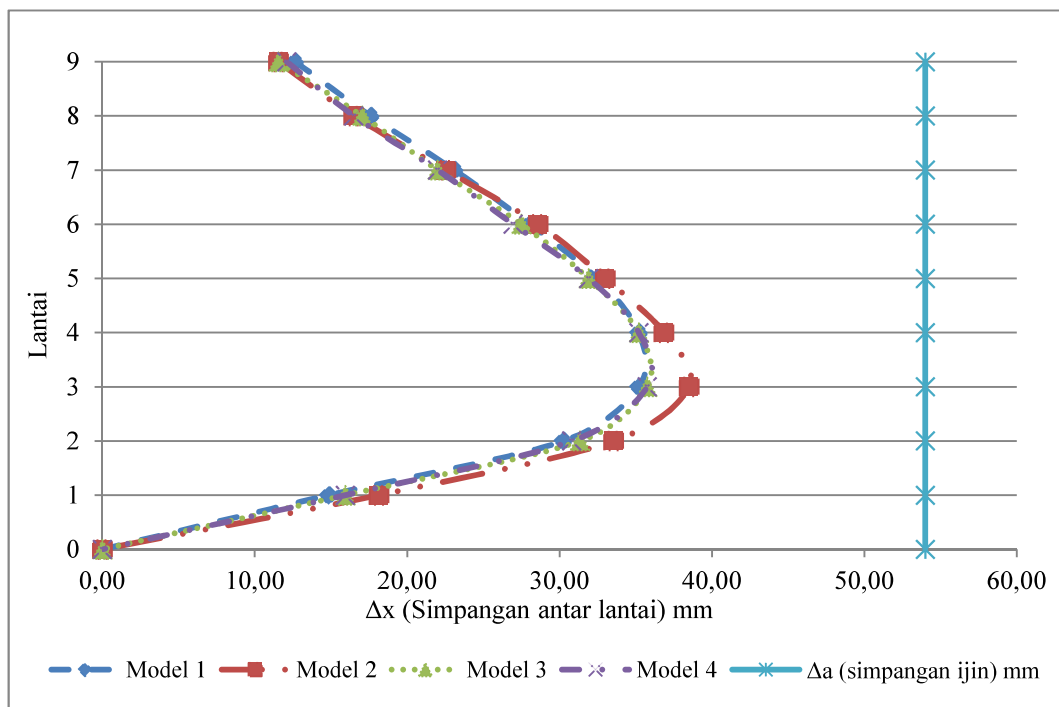
Simpangan antar lantai tidak boleh melebihi simpangan antar lantai tingkat ijin yang ditentukan dengan sesuai Tabel (3.11) diperoleh persamaan berikut.

$$\begin{aligned}\delta_a &= \frac{0,02 \times h_{sx}}{\rho} \\ &= \frac{0,02 \times 3510}{1,3} \\ &= 54 \text{ mm}\end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas dapat dilihat bahwa simpangan antar lantai $\Delta_2 = 30,25$ mm memenuhi persyaratan lebih kecil dari simpangan antar lantai tingkat ijin $\Delta_a = 54$ mm. perhitungan simpangan antar lantai dan simpangan antar lantai tingkat ijin untuk *joint* 1 hingga *joint* 8 pada semua model dapat dilihat pada Tabel 5.62 hingga Tabel 5.77 serta Gambar 5.19 hingga Gambar 5.34.

Tabel 5.62 Simpangan Antar Lantai Arah X Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 1 Model 1 hingga Model 4

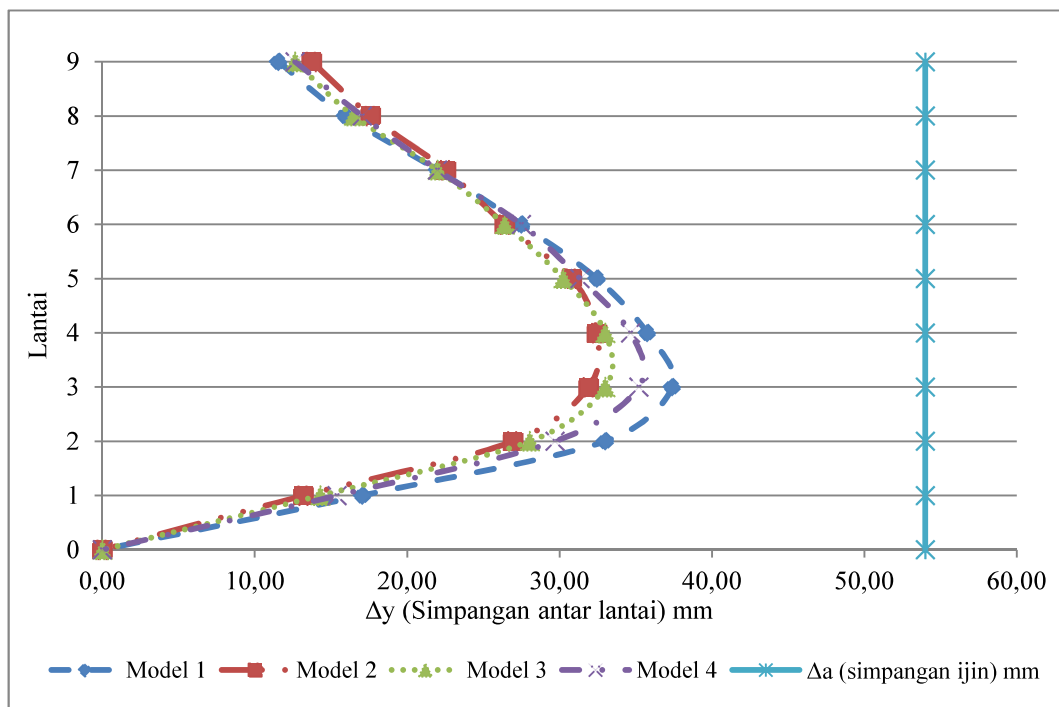
| Lantai | Δx (Simpangan antar lantai) mm | | | | Δa (simpangan ijin) mm |
|--------|--|---------|---------|---------|--------------------------------|
| | Model 1 | Model 2 | Model 3 | Model 4 | |
| 9 | 12,65 | 11,55 | 11,55 | 12,10 | 54 |
| 8 | 17,60 | 16,50 | 17,05 | 16,50 | 54 |
| 7 | 23,10 | 22,55 | 22,00 | 22,00 | 54 |
| 6 | 28,05 | 28,60 | 27,50 | 26,95 | 54 |
| 5 | 32,45 | 33,00 | 31,90 | 31,90 | 54 |
| 4 | 35,20 | 36,85 | 35,20 | 35,20 | 54 |
| 3 | 35,20 | 38,50 | 35,75 | 35,75 | 54 |
| 2 | 30,25 | 33,55 | 31,35 | 30,80 | 54 |
| 1 | 14,85 | 18,15 | 15,95 | 15,95 | 54 |



Gambar 5.19 Simpangan Antar Lantai Arah X Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 1 Model 1 hingga Model 4

Tabel 5.63 Simpangan Antar Lantai Arah Y Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 1 Model 1 Hingga Model 4

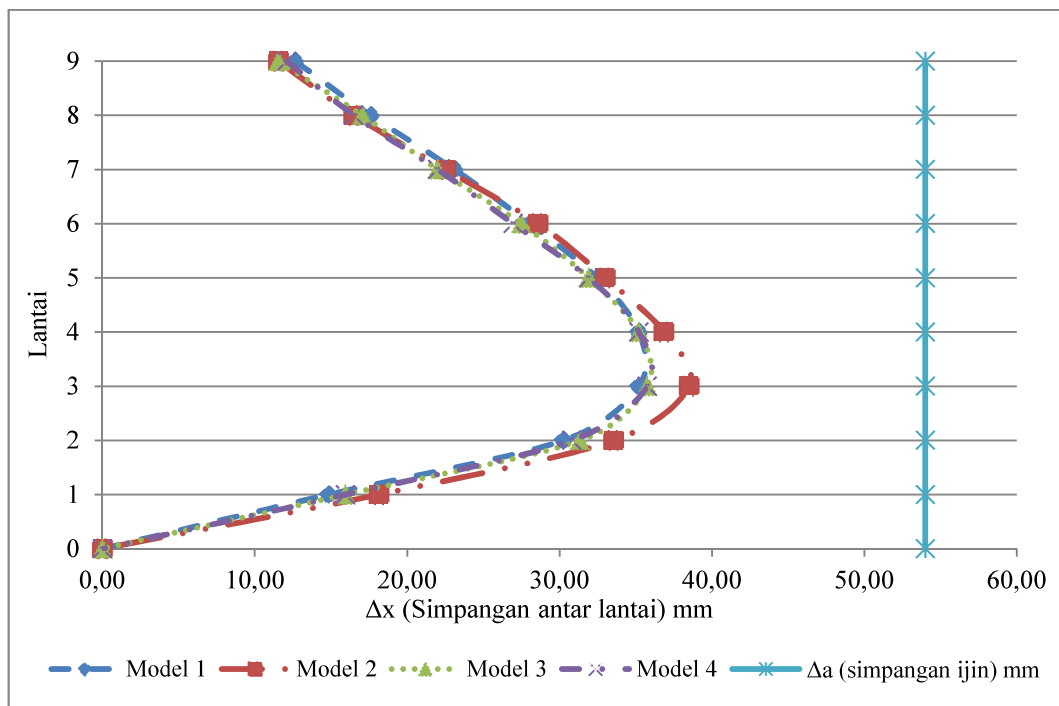
| Lantai | Δy (Simpangan antar lantai) mm | | | | Δa (simpangan ijin) mm |
|--------|--|---------|---------|---------|--------------------------------|
| | Model 1 | Model 2 | Model 3 | Model 4 | |
| 9 | 11,55 | 13,75 | 12,65 | 12,65 | 54 |
| 8 | 15,95 | 17,60 | 16,50 | 17,05 | 54 |
| 7 | 22,00 | 22,55 | 22,00 | 22,00 | 54 |
| 6 | 27,50 | 26,40 | 26,40 | 27,50 | 54 |
| 5 | 32,45 | 30,80 | 30,25 | 31,35 | 54 |
| 4 | 35,75 | 32,45 | 33,00 | 34,65 | 54 |
| 3 | 37,40 | 31,90 | 33,00 | 35,20 | 54 |
| 2 | 33,00 | 26,95 | 28,05 | 29,70 | 54 |
| 1 | 17,05 | 13,20 | 14,30 | 15,40 | 54 |



Gambar 5.20 Simpangan Antar Lantai Arah Y Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 1 Model 1 Hingga Model 4

Tabel 5.64 Simpangan Antar Lantai Arah X Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 2 Model 1 Hingga Model 4

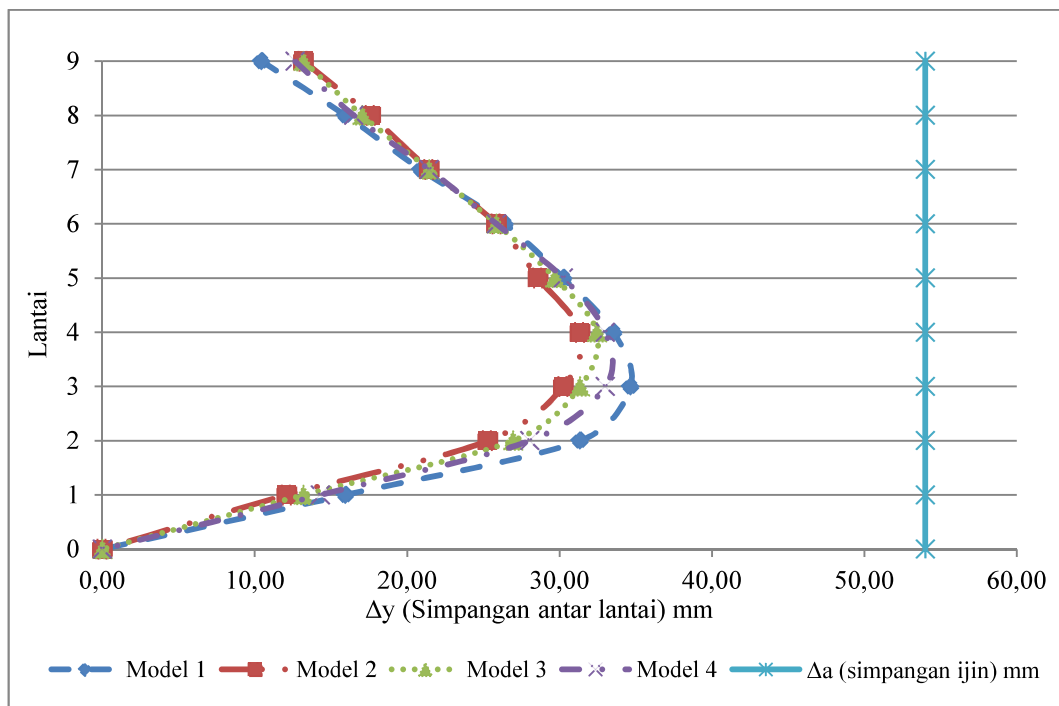
| Lantai | Δx (Simpangan antar lantai) mm | | | | Δa (simpangan ijin) mm |
|--------|--|---------|---------|---------|--------------------------------|
| | Model 1 | Model 2 | Model 3 | Model 4 | |
| 9 | 12,65 | 11,55 | 11,55 | 12,10 | 54 |
| 8 | 17,60 | 16,50 | 17,05 | 16,50 | 54 |
| 7 | 23,10 | 22,55 | 22,00 | 22,00 | 54 |
| 6 | 28,05 | 28,60 | 27,50 | 26,95 | 54 |
| 5 | 32,45 | 33,00 | 31,90 | 31,90 | 54 |
| 4 | 35,20 | 36,85 | 35,20 | 35,20 | 54 |
| 3 | 35,20 | 38,50 | 35,75 | 35,75 | 54 |
| 2 | 30,25 | 33,55 | 31,35 | 30,80 | 54 |
| 1 | 14,85 | 18,15 | 15,95 | 15,95 | 54 |



Gambar 5.21 Simpangan Antar Lantai Arah X Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 2 Model 1 Hingga Model 4

Tabel 5.65 Simpangan Antar Lantai Arah Y Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 2 Model 1 Hingga Model 4

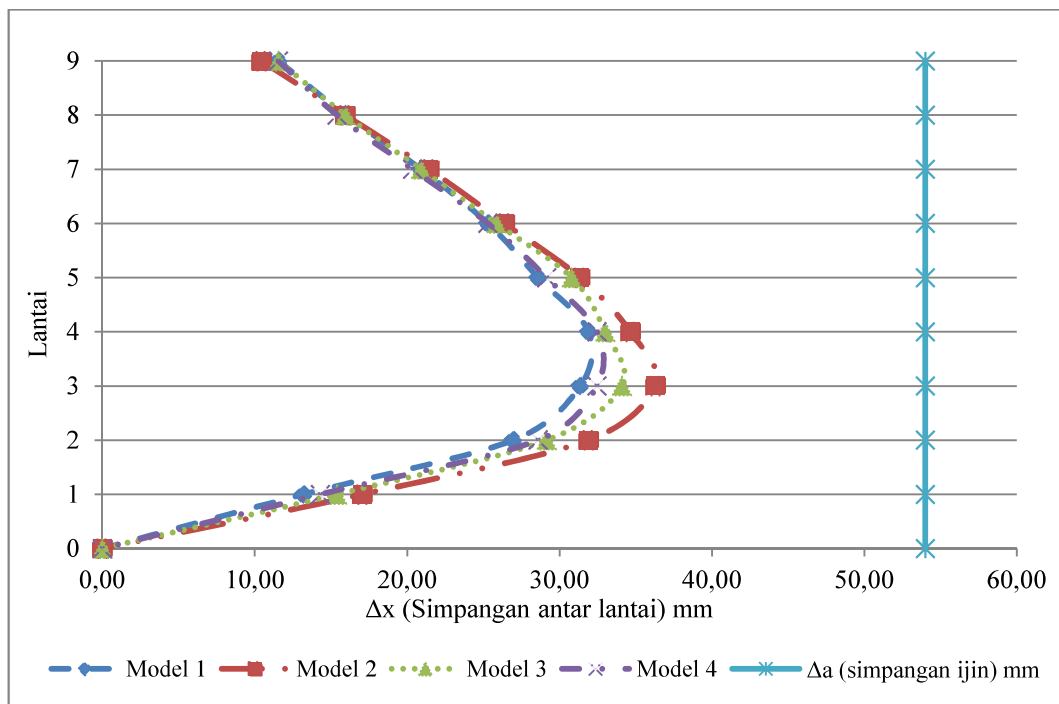
| Lantai | Δy (Simpangan antar lantai) mm | | | | Δa (simpangan ijin) mm |
|--------|--|---------|---------|---------|--------------------------------|
| | Model 1 | Model 2 | Model 3 | Model 4 | |
| 9 | 10,45 | 13,20 | 13,20 | 12,65 | 54 |
| 8 | 15,95 | 17,60 | 17,05 | 16,50 | 54 |
| 7 | 20,90 | 21,45 | 21,45 | 21,45 | 54 |
| 6 | 26,40 | 25,85 | 25,85 | 25,85 | 54 |
| 5 | 30,25 | 28,60 | 29,70 | 30,25 | 54 |
| 4 | 33,55 | 31,35 | 32,45 | 33,00 | 54 |
| 3 | 34,65 | 30,25 | 31,35 | 33,00 | 54 |
| 2 | 31,35 | 25,30 | 26,95 | 28,05 | 54 |
| 1 | 15,95 | 12,10 | 13,20 | 14,30 | 54 |



Gambar 5.22 Simpangan Antar Lantai Arah Y Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 2 Model 1 Hingga Model 4

Tabel 5.66 Simpangan Antar Lantai Arah X Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 3 Model 1 Hingga Model 4

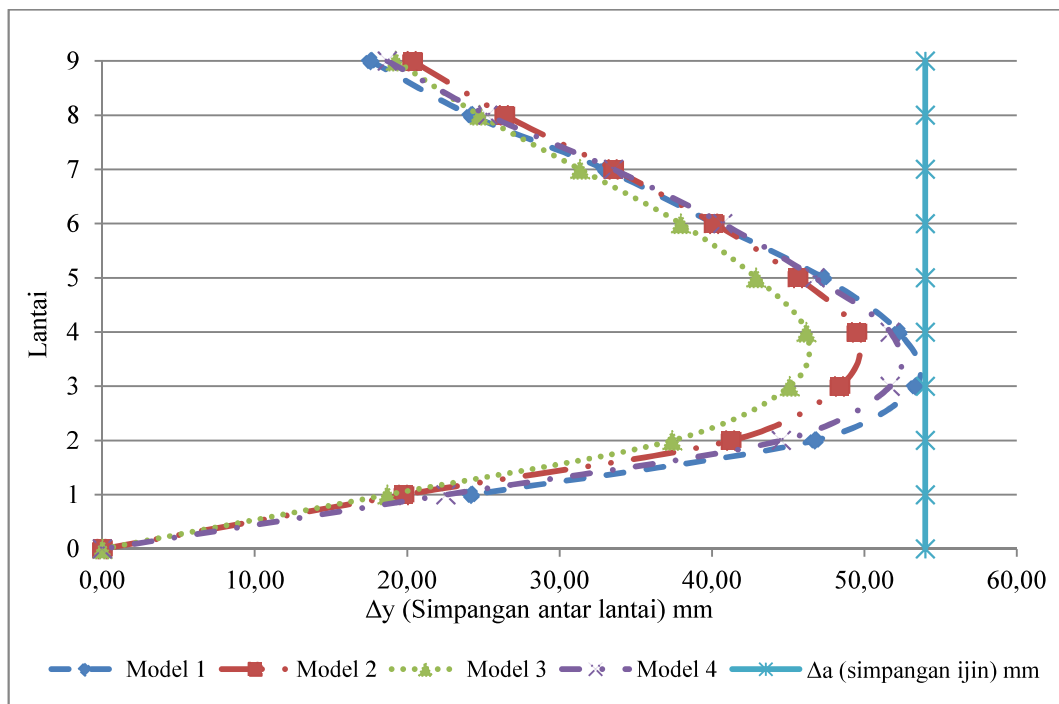
| Lantai | Δx (Simpangan antar lantai) mm | | | | Δa (simpangan ijin) mm |
|--------|--|---------|---------|---------|--------------------------------|
| | Model 1 | Model 2 | Model 3 | Model 4 | |
| 9 | 11,55 | 10,45 | 11,55 | 11,55 | 54 |
| 8 | 15,95 | 15,95 | 15,95 | 15,40 | 54 |
| 7 | 20,90 | 21,45 | 20,90 | 20,35 | 54 |
| 6 | 25,30 | 26,40 | 25,85 | 25,30 | 54 |
| 5 | 28,60 | 31,35 | 30,80 | 29,15 | 54 |
| 4 | 31,90 | 34,65 | 33,00 | 32,45 | 54 |
| 3 | 31,35 | 36,30 | 34,10 | 32,45 | 54 |
| 2 | 26,95 | 31,90 | 29,15 | 28,60 | 54 |
| 1 | 13,20 | 17,05 | 15,40 | 14,30 | 54 |



Gambar 5.23 Simpangan Antar Lantai Arah X Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 3 Model 1 Hingga Model 4

Tabel 5.67 Simpangan Antar Lantai Arah Y Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 3 Model 1 Hingga Model 4

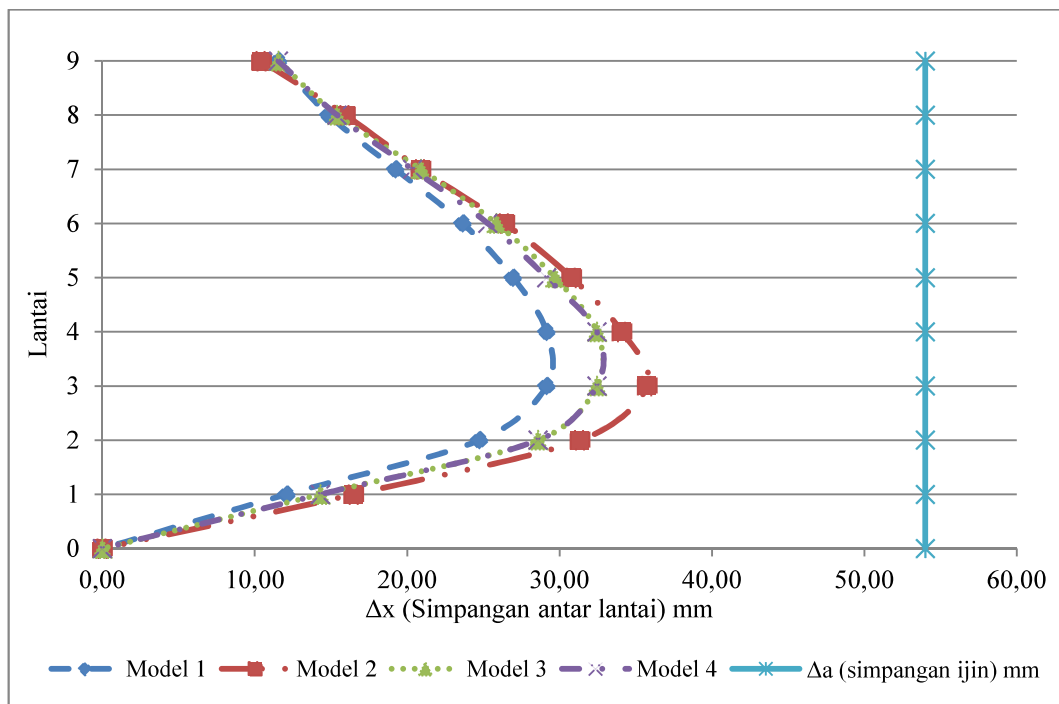
| Lantai | Δx (Simpangan antar lantai) mm | | | | Δa (simpangan ijin) mm |
|--------|--|---------|---------|---------|--------------------------------|
| | Model 1 | Model 2 | Model 3 | Model 4 | |
| 9 | 17,60 | 20,35 | 19,25 | 18,70 | 54 |
| 8 | 24,20 | 26,40 | 24,75 | 25,30 | 54 |
| 7 | 33,00 | 33,55 | 31,35 | 33,55 | 54 |
| 6 | 40,15 | 40,15 | 37,95 | 40,70 | 54 |
| 5 | 47,30 | 45,65 | 42,90 | 46,75 | 54 |
| 4 | 52,25 | 49,50 | 46,20 | 51,70 | 54 |
| 3 | 53,35 | 48,40 | 45,10 | 51,70 | 54 |
| 2 | 46,75 | 41,25 | 37,40 | 44,55 | 54 |
| 1 | 24,20 | 19,80 | 18,70 | 22,55 | 54 |



Gambar 5.24 Simpangan Antar Lantai Arah Y Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 3 Model 1 Hingga Model 4

Tabel 5.68 Simpangan Antar Lantai Arah X Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 4 Model 1 Hingga Model 4

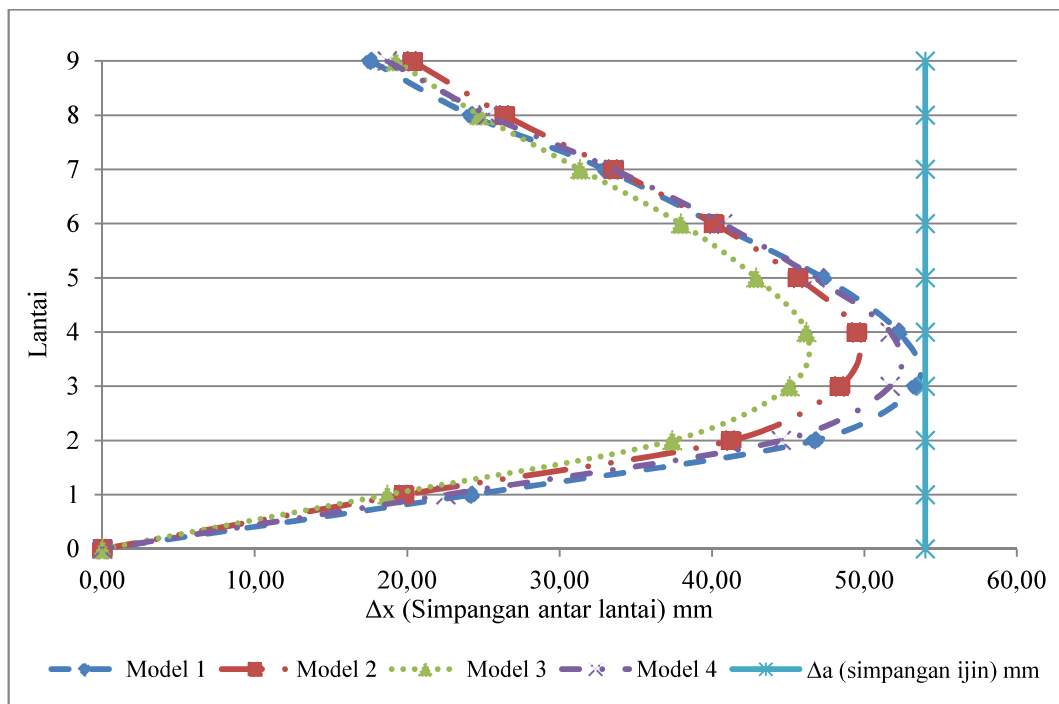
| Lantai | Δx (Simpangan antar lantai) mm | | | | Δa (simpangan ijin) mm |
|--------|--|---------|---------|---------|--------------------------------|
| | Model 1 | Model 2 | Model 3 | Model 4 | |
| 9 | 11,55 | 10,45 | 11,55 | 11,55 | 54 |
| 8 | 14,85 | 15,95 | 15,40 | 15,40 | 54 |
| 7 | 19,25 | 20,90 | 20,90 | 20,35 | 54 |
| 6 | 23,65 | 26,40 | 25,85 | 25,30 | 54 |
| 5 | 26,95 | 30,80 | 29,70 | 29,15 | 54 |
| 4 | 29,15 | 34,10 | 32,45 | 32,45 | 54 |
| 3 | 29,15 | 35,75 | 32,45 | 32,45 | 54 |
| 2 | 24,75 | 31,35 | 28,60 | 28,60 | 54 |
| 1 | 12,10 | 16,50 | 14,30 | 14,30 | 54 |



Gambar 5.25 Simpangan Antar Lantai Arah X Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 4 Model 1 Hingga Model 4

Tabel 5.69 Simpangan Antar Lantai Arah Y Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 4 Model 1 Hingga Model 4

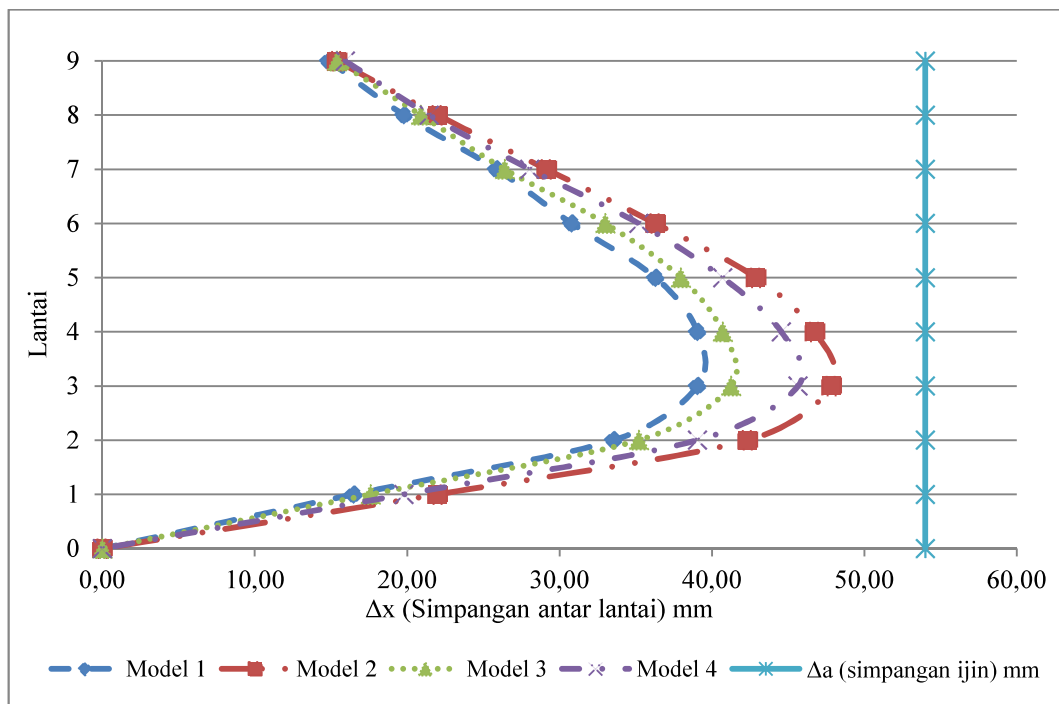
| Lantai | Δx (Simpangan antar lantai) mm | | | | Δa (simpangan ijin) mm |
|--------|--|---------|---------|---------|--------------------------------|
| | Model 1 | Model 2 | Model 3 | Model 4 | |
| 9 | 17,60 | 20,35 | 19,25 | 18,70 | 54 |
| 8 | 24,20 | 26,40 | 24,75 | 25,30 | 54 |
| 7 | 33,00 | 33,55 | 31,35 | 33,55 | 54 |
| 6 | 40,15 | 40,15 | 37,95 | 40,70 | 54 |
| 5 | 47,30 | 45,65 | 42,90 | 46,75 | 54 |
| 4 | 52,25 | 49,50 | 46,20 | 51,70 | 54 |
| 3 | 53,35 | 48,40 | 45,10 | 51,70 | 54 |
| 2 | 46,75 | 41,25 | 37,40 | 44,55 | 54 |
| 1 | 24,20 | 19,80 | 18,70 | 22,55 | 54 |



Gambar 5.26 Simpangan Antar Lantai Arah Y Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 4 Model 1 Hingga Model 4

Tabel 5.70 Simpangan Antar Lantai Arah X Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 5 Model 1 Hingga Model 4

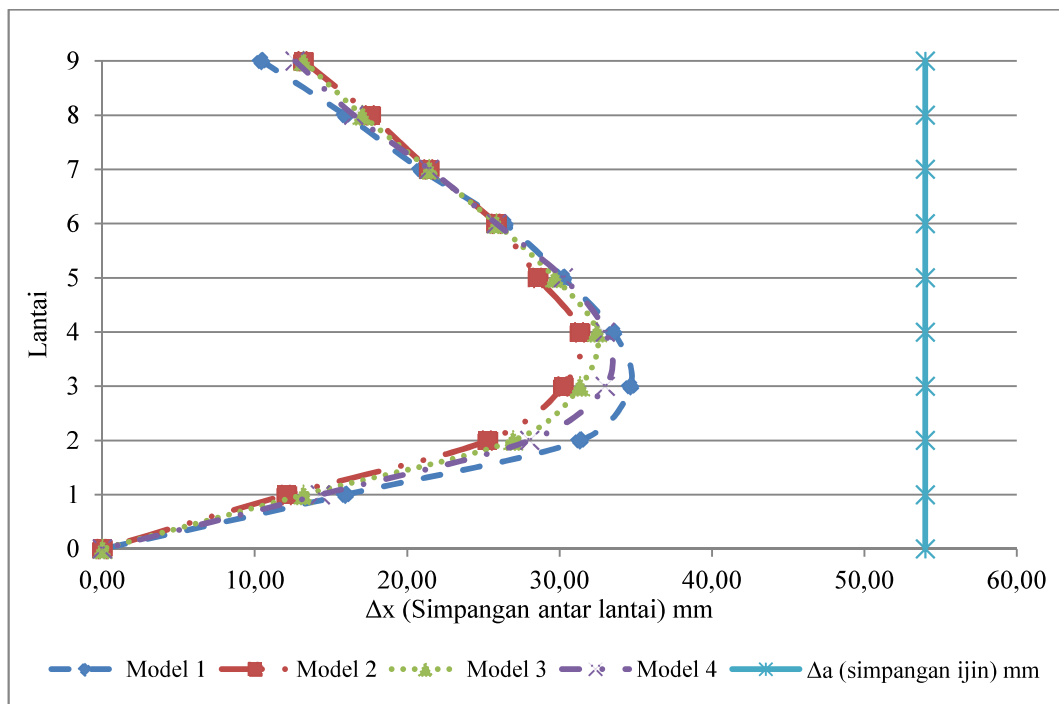
| Lantai | Δx (Simpangan antar lantai) mm | | | | Δa (simpangan ijin) mm |
|--------|--|---------|---------|---------|--------------------------------|
| | Model 1 | Model 2 | Model 3 | Model 4 | |
| 9 | 14,85 | 15,40 | 15,40 | 15,95 | 54 |
| 8 | 19,80 | 22,00 | 20,90 | 21,45 | 54 |
| 7 | 25,85 | 29,15 | 26,40 | 28,05 | 54 |
| 6 | 30,80 | 36,30 | 33,00 | 35,20 | 54 |
| 5 | 36,30 | 42,90 | 37,95 | 40,70 | 54 |
| 4 | 39,05 | 46,75 | 40,70 | 44,55 | 54 |
| 3 | 39,05 | 47,85 | 41,25 | 45,65 | 54 |
| 2 | 33,55 | 42,35 | 35,20 | 39,05 | 54 |
| 1 | 16,50 | 22,00 | 17,60 | 19,80 | 54 |



Gambar 5.27 Simpangan Antar Lantai Arah X Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 5 Model 1 Hingga Model 4

Tabel 5.71 Simpangan Antar Lantai Arah Y Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 5 Model 1 Hingga Model 4

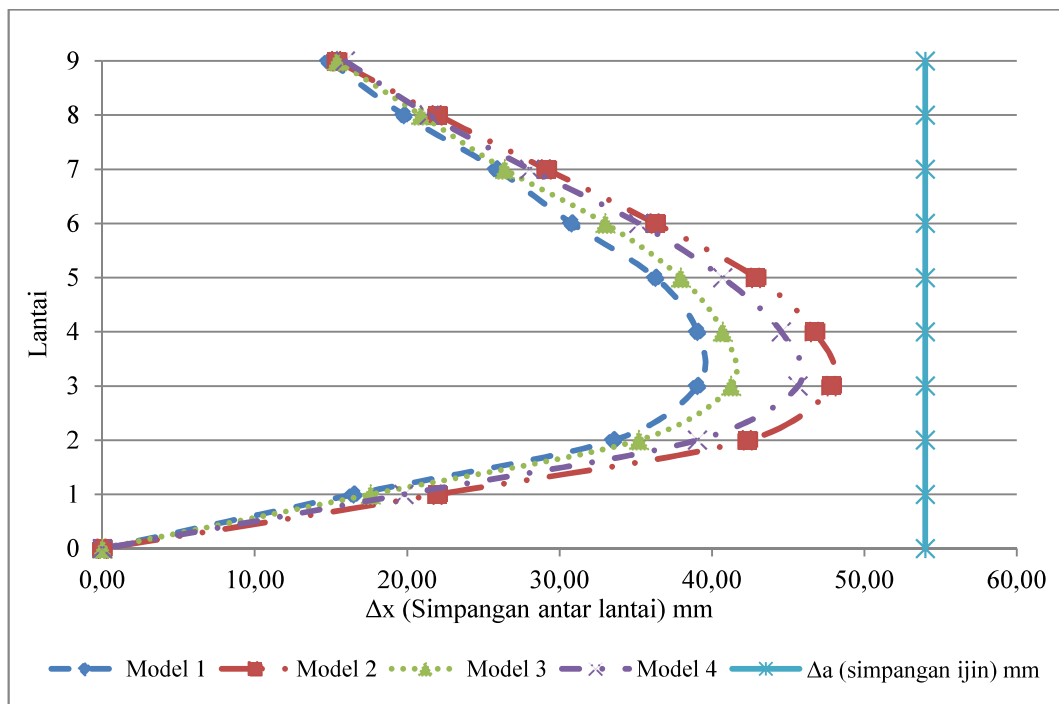
| Lantai | Δx (Simpangan antar lantai) mm | | | | Δa (simpangan ijin) mm |
|--------|--|---------|---------|---------|--------------------------------|
| | Model 1 | Model 2 | Model 3 | Model 4 | |
| 9 | 10,45 | 13,20 | 13,20 | 12,65 | 54 |
| 8 | 15,95 | 17,60 | 17,05 | 16,50 | 54 |
| 7 | 20,90 | 21,45 | 21,45 | 21,45 | 54 |
| 6 | 26,40 | 25,85 | 25,85 | 25,85 | 54 |
| 5 | 30,25 | 28,60 | 29,70 | 30,25 | 54 |
| 4 | 33,55 | 31,35 | 32,45 | 33,00 | 54 |
| 3 | 34,65 | 30,25 | 31,35 | 33,00 | 54 |
| 2 | 31,35 | 25,30 | 26,95 | 28,05 | 54 |
| 1 | 15,95 | 12,10 | 13,20 | 14,30 | 54 |



Gambar 5.28 Simpangan Antar Lantai Arah Y Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 5 Model 1 Hingga Model 4

Tabel 5.72 Simpangan Antar Lantai Arah X Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 6 Model 1 Hingga Model 4

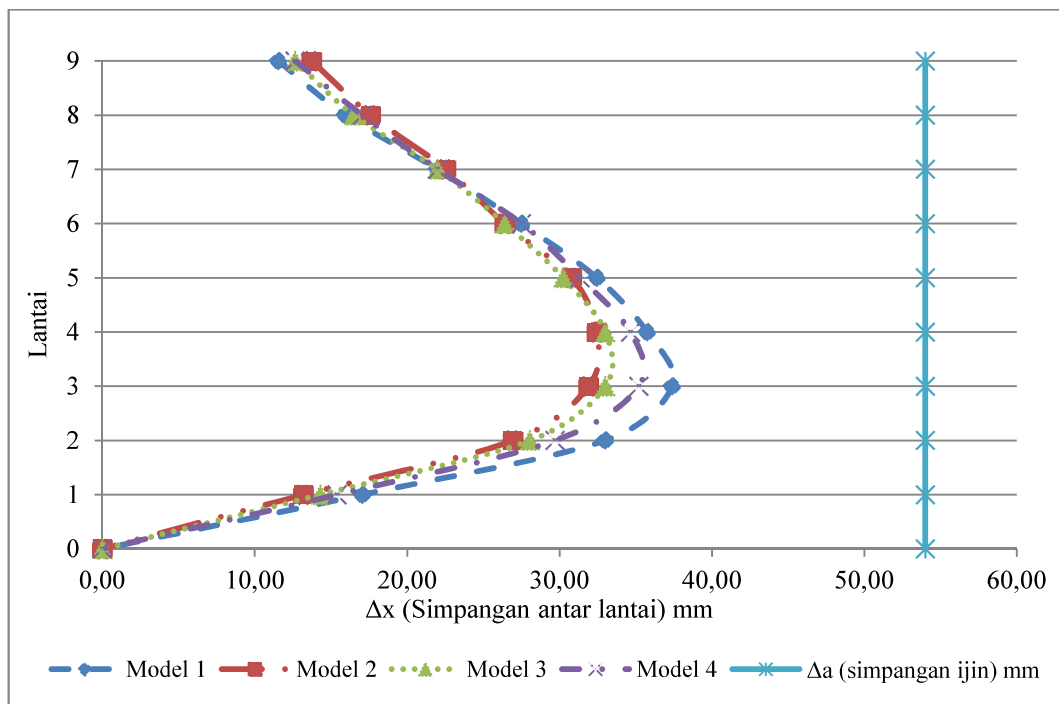
| Lantai | Δx (Simpangan antar lantai) mm | | | | Δa (simpangan ijin) mm |
|--------|--|---------|---------|---------|--------------------------------|
| | Model 1 | Model 2 | Model 3 | Model 4 | |
| 9 | 14,85 | 15,40 | 15,40 | 15,95 | 54 |
| 8 | 19,80 | 22,00 | 20,90 | 21,45 | 54 |
| 7 | 25,85 | 29,15 | 26,40 | 28,05 | 54 |
| 6 | 30,80 | 36,30 | 33,00 | 35,20 | 54 |
| 5 | 36,30 | 42,90 | 37,95 | 40,70 | 54 |
| 4 | 39,05 | 46,75 | 40,70 | 44,55 | 54 |
| 3 | 39,05 | 47,85 | 41,25 | 45,65 | 54 |
| 2 | 33,55 | 42,35 | 35,20 | 39,05 | 54 |
| 1 | 16,50 | 22,00 | 17,60 | 19,80 | 54 |



Gambar 5.29 Simpangan Antar Lantai Arah X Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 6 Model 1 Hingga Model 4

Tabel 5.73 Simpangan Antar Lantai Arah Y Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 6 Model 1 Hingga Model 4

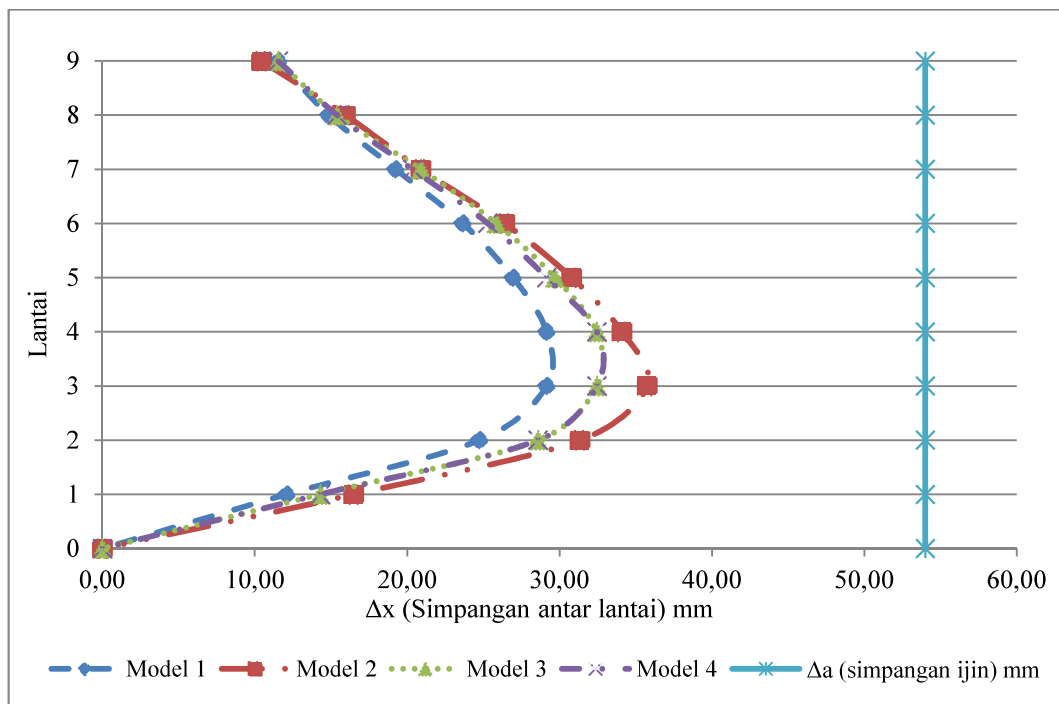
| Lantai | Δx (Simpangan antar lantai) mm | | | | Δa (simpangan ijin) mm |
|--------|--|---------|---------|---------|--------------------------------|
| | Model 1 | Model 2 | Model 3 | Model 4 | |
| 9 | 11,55 | 13,75 | 12,65 | 12,65 | 54 |
| 8 | 15,95 | 17,60 | 16,50 | 17,05 | 54 |
| 7 | 22,00 | 22,55 | 22,00 | 22,00 | 54 |
| 6 | 27,50 | 26,40 | 26,40 | 27,50 | 54 |
| 5 | 32,45 | 30,80 | 30,25 | 31,35 | 54 |
| 4 | 35,75 | 32,45 | 33,00 | 34,65 | 54 |
| 3 | 37,40 | 31,90 | 33,00 | 35,20 | 54 |
| 2 | 33,00 | 26,95 | 28,05 | 29,70 | 54 |
| 1 | 17,05 | 13,20 | 14,30 | 15,40 | 54 |



Gambar 5.30 Simpangan Antar Lantai Arah Y Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 6 Model 1 Hingga Model 4

Tabel 5.74 Simpangan Antar Lantai Arah X Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 7 Model 1 Hingga Model 4

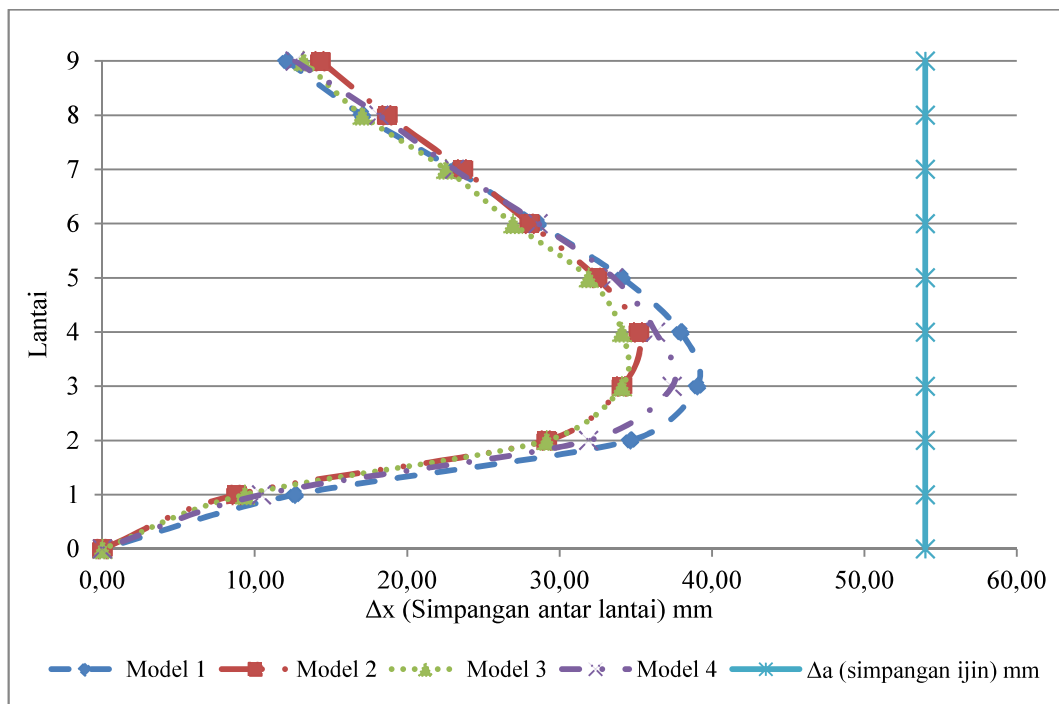
| Lantai | Δx (Simpangan antar lantai) mm | | | | Δa (simpangan ijin) mm |
|--------|--|---------|---------|---------|--------------------------------|
| | Model 1 | Model 2 | Model 3 | Model 4 | |
| 9 | 11,55 | 10,45 | 11,55 | 11,55 | 54 |
| 8 | 14,85 | 15,95 | 15,40 | 15,40 | 54 |
| 7 | 19,25 | 20,90 | 20,90 | 20,35 | 54 |
| 6 | 23,65 | 26,40 | 25,85 | 25,30 | 54 |
| 5 | 26,95 | 30,80 | 29,70 | 29,15 | 54 |
| 4 | 29,15 | 34,10 | 32,45 | 32,45 | 54 |
| 3 | 29,15 | 35,75 | 32,45 | 32,45 | 54 |
| 2 | 24,75 | 31,35 | 28,60 | 28,60 | 54 |
| 1 | 12,10 | 16,50 | 14,30 | 14,30 | 54 |



Gambar 5.31 Simpangan Antar Lantai Arah X Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 7 Model 1 Hingga Model 4

Tabel 5.75 Simpangan Antar Lantai Arah Y Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 7 Model 1 Hingga Model 4

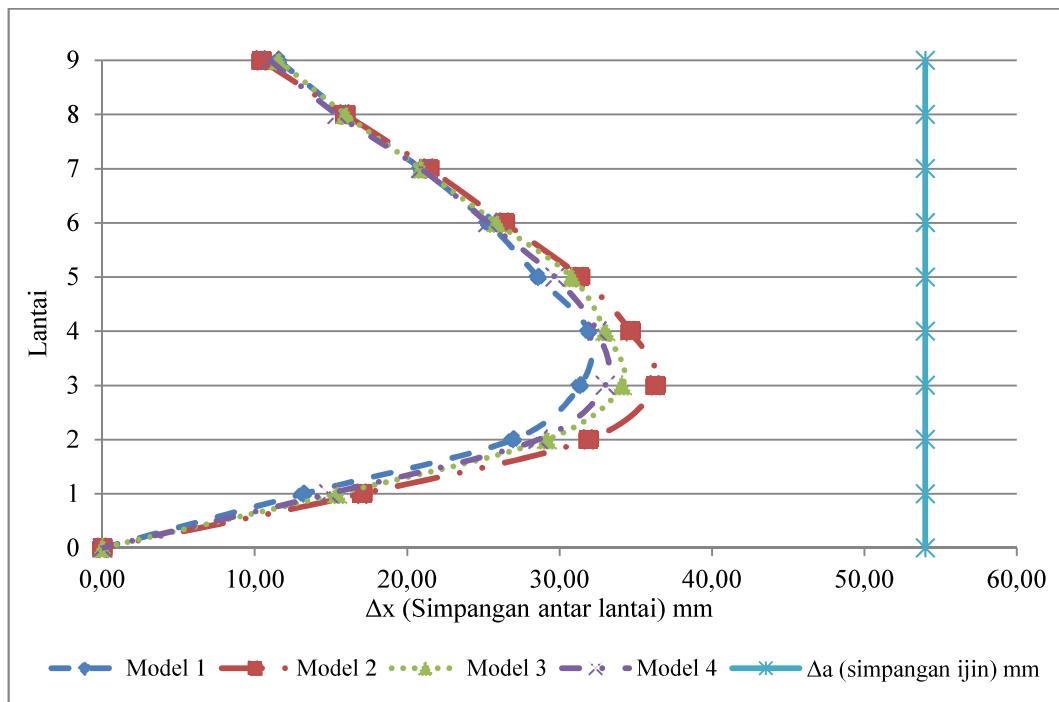
| Lantai | Δx (Simpangan antar lantai) mm | | | | Δa (simpangan ijin) mm |
|--------|--|---------|---------|---------|--------------------------------|
| | Model 1 | Model 2 | Model 3 | Model 4 | |
| 9 | 12,10 | 14,30 | 13,20 | 12,65 | 54 |
| 8 | 17,05 | 18,70 | 17,05 | 18,15 | 54 |
| 7 | 23,10 | 23,65 | 22,55 | 23,10 | 54 |
| 6 | 28,60 | 28,05 | 26,95 | 28,60 | 54 |
| 5 | 34,10 | 32,45 | 31,90 | 33,55 | 54 |
| 4 | 37,95 | 35,20 | 34,10 | 36,30 | 54 |
| 3 | 39,05 | 34,10 | 34,10 | 37,40 | 54 |
| 2 | 34,65 | 29,15 | 29,15 | 31,90 | 54 |
| 1 | 12,65 | 8,80 | 9,35 | 10,45 | 54 |



Gambar 5.32 Simpangan Antar Lantai Arah Y Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 7 Model 1 Hingga Model 4

Tabel 5.76 Simpangan Antar Lantai Arah X Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 8 Model 1 Hingga Model 4

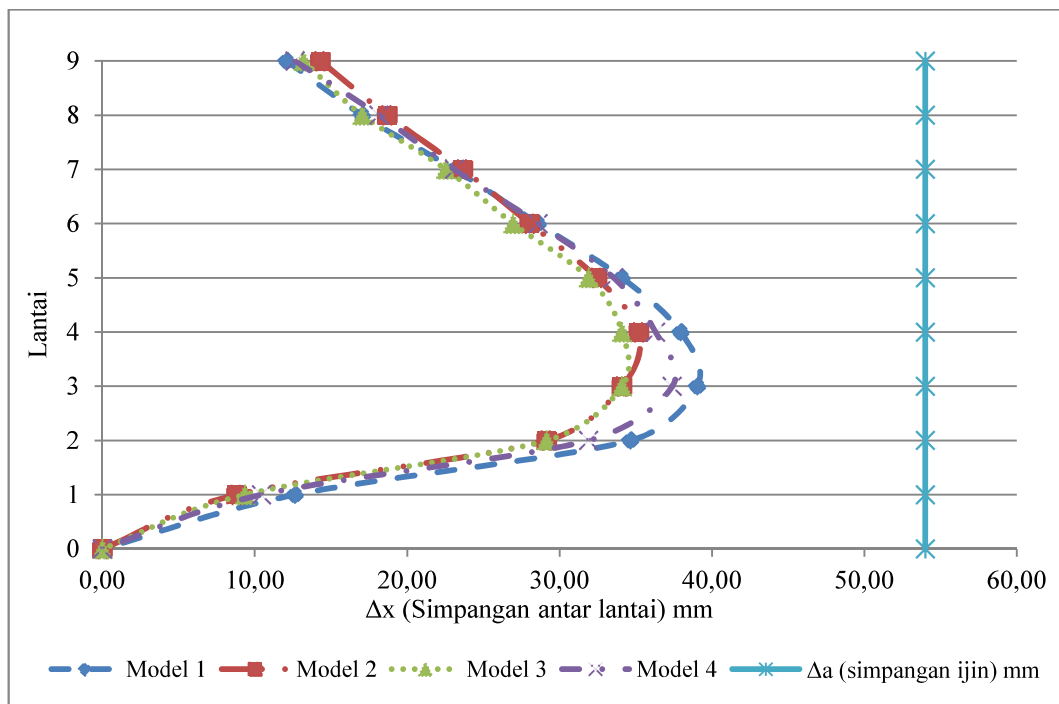
| Lantai | Δx (Simpangan antar lantai) mm | | | | Δa (simpangan ijin) mm |
|--------|--|---------|---------|---------|--------------------------------|
| | Model 1 | Model 2 | Model 3 | Model 4 | |
| 9 | 11,55 | 10,45 | 11,55 | 11,00 | 54 |
| 8 | 15,95 | 15,95 | 15,95 | 15,40 | 54 |
| 7 | 20,90 | 21,45 | 20,90 | 20,90 | 54 |
| 6 | 25,30 | 26,40 | 25,85 | 25,30 | 54 |
| 5 | 28,60 | 31,35 | 30,80 | 29,70 | 54 |
| 4 | 31,90 | 34,65 | 33,00 | 32,45 | 54 |
| 3 | 31,35 | 36,30 | 34,10 | 33,00 | 54 |
| 2 | 26,95 | 31,90 | 29,15 | 28,60 | 54 |
| 1 | 13,20 | 17,05 | 15,40 | 14,85 | 54 |



Gambar 5.33 Simpangan Antar Lantai Arah X Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 8 Model 1 Hingga Model 4

Tabel 5.77 Simpangan Antar Lantai Arah Y Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 8 Model 1 Hingga Model 4

| Lantai | Δx (Simpangan antar lantai) mm | | | | Δa (simpangan ijin) mm |
|--------|--|---------|---------|---------|--------------------------------|
| | Model 1 | Model 2 | Model 3 | Model 4 | |
| 9 | 12,10 | 14,30 | 13,20 | 12,65 | 54 |
| 8 | 17,05 | 18,70 | 17,05 | 18,15 | 54 |
| 7 | 23,10 | 23,65 | 22,55 | 23,10 | 54 |
| 6 | 28,60 | 28,05 | 26,95 | 28,60 | 54 |
| 5 | 34,10 | 32,45 | 31,90 | 33,55 | 54 |
| 4 | 37,95 | 35,20 | 34,10 | 36,30 | 54 |
| 3 | 39,05 | 34,10 | 34,10 | 37,40 | 54 |
| 2 | 34,65 | 29,15 | 29,15 | 31,90 | 54 |
| 1 | 12,65 | 8,80 | 9,35 | 10,45 | 54 |



Gambar 5.34 Simpangan Antar Lantai Arah Y Dan Simpangan Antar Lantai Ijin
Joint 8 Model 1 Hingga Model 4

Dari hasil kontrol simpangan antar lantai diatas dapat dilihat bahwa simpangan antar lantai di semua titik yang ditinjau pada semua model telah memenuhi persyaratan lebih kecil dari simpangan antar lantai tingkat ijin $\Delta_a = 54$ mm. Secara umum dapat dilihat bahwa simpangan antar lantai dari satu model dengan model lainnya selisihnya tidak terlalu besar, hal ini disebabkan luas penampang kolom yang digunakan sama pada semua model sama.

Model yang memiliki nilai simpangan antar lantai pada arah x paling besar adalah model 2 pada lantai 3 *joint* 5 dan *joint* 6 sebesar 47,85 mm dimana pada model tersebut menggunakan kolom persegi panjang ditempatkan memanjang arah y sumbu global bangunan, sedangkan model yang memiliki nilai simpangan antar lantai pada arah y paling besar adalah model 1 pada lantai 3 *joint* 3 dan *joint* 4 sebesar 53,35 mm dimana pada model tersebut menggunakan kolom persegi panjang ditempatkan memanjang arah x sumbu global bangunan.

Hal tersebut terjadi karena bagian memanjang pada penampang kolom dalam hal ini penempatan kolom pada model 1 memanjang arah x sumbu global dan pada model 2 memanjang arah y sumbu global akan memberikan nilai inersia yang besar pada arah tersebut sehingga memberikan kekakuan yang juga besar, namun pada arah sebaliknya dimana pada model 1 arah y dan pada model 2 arah x memberikan nilai inersia yang kecil pada arah tersebut sehingga kurang kaku dalam menahan simpangan.

Pada model 3 dimana penempatan kolom persegi panjang dikombinasikan memanjang arah y untuk bentang yang memanjang arah x dan penempatan kolom memanjang arah x untuk bentang yang memanjang arah y, nilai simpangan antar lantai paling besar pada arah x berada pada lantai 3 *joint* 5 dan *joint* 6 sebesar 41,25 mm sedangkan nilai simpangan antar lantai paling besar pada arah y berada pada lantai 4 *joint* 3 dan *joint* 4 sebesar 46,2 mm. Nilai simpangan antar lantai pada model ini paling kecil pada kedua arah daripada model-model lain karena bagian memanjang pada penampang kolom persegi panjang yang memiliki inersia besar akan memberikan kekakuan yang juga besar, ditempatkan memanjang pada bentang struktur yang pendek dimana memiliki inersia yang kecil dan kurang kaku dalam menahan simpangan.

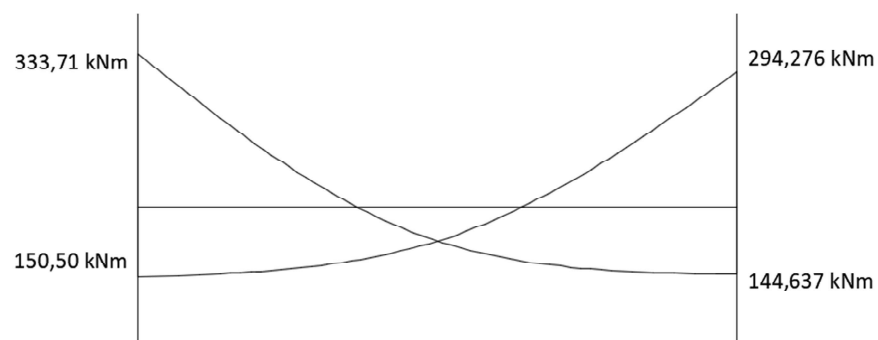
Pada model 4 dimana digunakan kolom bujur sangkar nilai simpangan antar lantai paling besar pada arah y berada pada lantai 4 titik 3 dan titik 4 sebesar 51,7 mm melebihi simpangan antar lantai paling besar pada arah x berada pada lantai 3 *joint* 5 dan *joint* 6 sebesar 45,65 mm. Hal ini karena penampang kolom di kedua arah memiliki inersia yang sama sehingga kekakuan dipengaruhi dari bentang struktur dimana bentang struktur memanjang pada arah x memiliki nilai inersia yang besar sehingga pada arah tersebut lebih kaku dalam menahan simpangan daripada arah sebaliknya yaitu pada arah y.

Setelah dilakukan kontrol simpangan antar lantai, dilakukan *pushover analysis* untuk memperoleh kurva kapasitas yang menunjukkan hubungan antara gaya geser dasar (V) dengan simpangan pada atap struktur (Δ) yang dapat diidelisasi menjadi kurva bilinear untuk mengetahui kekakuan efektif (K_e) dan daktilitas simpangan.

5.4 Perencanaan Balok

5.4.1 Redistribusi Momen

Hasil analisis struktur dari ETABS 2013 terkadang menghasilkan momen positif yang nilainya lebih kecil dari setengah momen negative pada daerah yang ditinjau. Sebagaimana yang disyaratkan, maka perlu dilakukan redistribusi momen dengan cara mengurangi momen negative dan menaikkan momen positif. Dibawah ini dicontohkan redistribusi momen pada balok 1 (B1) lantai 1 sampai 3 model 1. Dari hasil analisis ETABS 2013 diperoleh nilai momen ultimit pada balok B1 lantai 1 sampai 3 model 1 dapat dilihat pada Gambar 5.35 berikut.



Gambar 5.35 Momen pada Balok B1

Karena nilai $M_u^+ = 150,50 \text{ kNm} < \frac{1}{2} M_u^- = 166,85 \text{ kNm}$, maka perlu dilakukan redistribusi momen

$$\begin{aligned}\Sigma M &= M_u^- + M_u^+ + M_u^- + M_u^+ \\ &= 333,71 + 144,637 + 294,2759 + 150,50 \\ &= 923,125 \text{ kNm}\end{aligned}$$

Dicoba redistribusi sebesar 15% dari M_u^-

$$\begin{aligned}\text{Red } M_u^- &= 8\% \times M_u^- \\ &= 8\% \times 333,71 \\ &= 26,697 \text{ kNm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_u^- \text{ redistrib} &= M_u^- - \text{Red } M_u^- \\ &= 333,71 - 26,697 \\ &= 307,012 \text{ kNm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_u^+ \text{ redistrib} &= \frac{\Sigma M - (n \times M_u^- \text{ redistrib})}{n} \\ &= \frac{923,125 - (2 \times 307,012)}{2}\end{aligned}$$

$$M_u^+ \text{ redistrib} = 154,550 \text{ kNm} > \frac{1}{2} M_u^- \text{ redistrib} = 153,506 \text{ kNm}$$

Dari perhitungan diatas diperoleh nilai $M_u^+ \text{ redistrib} = 154,550 \text{ kNm}$ dan $M_u^- \text{ redistrib} = 307,012 \text{ kNm}$ yang selanjutnya digunakan untuk mendesain tulangan lentur balok B1 lantai 1 sampai 3 pada model 1. Hasil perhitungan redistribusi momen untuk tipe balok lain pada semua model dapat dilihat pada Tabel 5.78 hingga Tabel 5.81.

Tabel 5.78 Redistribusi Momen Balok Semua Tipe Model 1

| Balok | Lantai | sebelum redist | | % Momen | Kontrol | % redist | setelah redist | |
|-------|--------|----------------|-----------|---------|---------|----------|----------------|-----------|
| | | Mu- (kNm) | Mu+ (kNm) | | | | Mu- (kNm) | Mu+ (kNm) |
| B1 | 1,2,3 | 333,709 | 150,503 | 45,1 | Redist | 8% | 307,012 | 154,550 |
| | 4,5,6 | 328,494 | 143,983 | 43,8 | Redist | 5% | 312,070 | 160,408 |
| | 7,8,9 | 269,707 | 86,415 | 32,0 | Redist | 12% | 237,342 | 118,780 |
| B2 | 1,2,3 | 445,103 | 144,771 | 32,5 | Redist | 12% | 391,690 | 198,184 |
| | 4,5,6 | 441,143 | 144,370 | 32,7 | Redist | 12% | 388,206 | 197,307 |
| | 7,8,9 | 384,347 | 142,776 | 37,1 | Redist | 9% | 349,756 | 177,368 |
| B3 | 1,2,3 | 277,897 | 127,061 | 45,7 | Redist | 3% | 269,560 | 135,398 |
| | 4,5,6 | 276,637 | 123,864 | 44,8 | Redist | 4% | 265,571 | 134,929 |
| | 7,8,9 | 233,070 | 77,869 | 33,4 | Redist | 12% | 205,101 | 105,837 |
| B4 | 1,2,3 | 375,729 | 150,890 | 40,2 | Redist | 7% | 349,428 | 177,191 |
| | 4,5,6 | 376,308 | 150,793 | 40,1 | Redist | 7% | 349,967 | 177,134 |
| | 7,8,9 | 340,141 | 148,605 | 43,7 | Redist | 5% | 323,134 | 165,612 |
| Ba1 | 1,2,3 | 76,588 | 53,333 | 69,6 | OK | 0% | 76,588 | 53,333 |
| | 4,5,6 | 76,677 | 53,239 | 69,4 | OK | 0% | 76,677 | 53,239 |
| | 7,8,9 | 74,839 | 52,046 | 69,5 | OK | 0% | 74,839 | 52,046 |
| Ba2 | 1,2,3 | 127,898 | 64,603 | 50,5 | OK | 0% | 127,898 | 64,603 |
| | 4,5,6 | 127,550 | 64,321 | 50,4 | OK | 0% | 127,550 | 64,321 |
| | 7,8,9 | 122,920 | 62,245 | 50,6 | OK | 0% | 122,920 | 62,245 |

Tabel 5.79 Redistribusi Momen Balok Semua Tipe Model 2

| Balok | Lantai | sebelum redist | | % Momen | Kontrol | % redist | setelah redist | |
|-------|--------|----------------|-----------|---------|---------|----------|----------------|-----------|
| | | Mu- (kNm) | Mu+ (kNm) | | | | Mu- (kNm) | Mu+ (kNm) |
| B1 | 1,2,3 | 320,114 | 134,814 | 42,1 | Redist | 6% | 300,907 | 154,020 |
| | 4,5,6 | 320,541 | 134,000 | 41,8 | Redist | 6% | 301,309 | 153,232 |
| | 7,8,9 | 276,106 | 93,316 | 33,8 | Redist | 11% | 245,735 | 123,688 |
| B2 | 1,2,3 | 433,838 | 146,487 | 33,8 | Redist | 11% | 386,116 | 194,209 |
| | 4,5,6 | 435,967 | 146,402 | 33,6 | Redist | 11% | 388,011 | 194,359 |
| | 7,8,9 | 394,818 | 145,507 | 36,9 | Redist | 9% | 359,284 | 181,040 |
| B3 | 1,2,3 | 301,693 | 137,656 | 45,6 | Redist | 3% | 292,642 | 146,707 |
| | 4,5,6 | 297,175 | 131,903 | 44,4 | Redist | 4% | 285,288 | 143,790 |
| | 7,8,9 | 244,678 | 79,504 | 32,5 | Redist | 12% | 215,317 | 108,865 |
| B4 | 1,2,3 | 402,389 | 158,609 | 39,4 | Redist | 8% | 370,198 | 190,800 |
| | 4,5,6 | 398,870 | 158,322 | 39,7 | Redist | 7% | 370,949 | 186,243 |
| | 7,8,9 | 350,217 | 155,883 | 44,5 | Redist | 4% | 336,208 | 169,892 |

Lanjutan Tabel 5.79 Redistribusi Momen Balok Semua Tipe Model 2

| Balok | Lantai | sebelum redistribusi | | % Momen | Kontrol | % redistribusi | setelah redistribusi | |
|-------|--------|----------------------|-----------|---------|---------|----------------|----------------------|-----------|
| | | Mu- (kNm) | Mu- (kNm) | | | | Mu- (kNm) | Mu- (kNm) |
| Ba1 | 1,2,3 | 80,940 | 56,817 | 70,2 | OK | 0% | 80,940 | 56,817 |
| | 4,5,6 | 80,851 | 56,593 | 70,0 | OK | 0% | 80,851 | 56,593 |
| | 7,8,9 | 78,579 | 55,190 | 70,2 | OK | 0% | 78,579 | 55,190 |
| Ba2 | 1,2,3 | 119,410 | 62,018 | 51,9 | OK | 0% | 119,410 | 62,018 |
| | 4,5,6 | 119,715 | 62,001 | 51,8 | OK | 0% | 119,715 | 62,001 |
| | 7,8,9 | 116,802 | 60,605 | 51,9 | OK | 0% | 116,802 | 60,605 |

Tabel 5.80 Redistribusi Momen Balok Semua Tipe Model 3

| Balok | Lantai | sebelum redistribusi | | % Momen | Kontrol | % redistribusi | setelah redistribusi | |
|-------|--------|----------------------|-----------|---------|---------|----------------|----------------------|-----------|
| | | Mu- (kNm) | Mu+ (kNm) | | | | Mu- (kNm) | Mu+ (kNm) |
| B1 | 1,2,3 | 305,062 | 123,429 | 40,5 | Redist | 7% | 283,707 | 144,783 |
| | 4,5,6 | 306,400 | 119,715 | 39,1 | Redist | 8% | 281,888 | 144,227 |
| | 7,8,9 | 266,119 | 88,098 | 33,1 | Redist | 12% | 234,185 | 120,033 |
| B2 | 1,2,3 | 423,594 | 147,089 | 34,7 | Redist | 11% | 376,998 | 193,684 |
| | 4,5,6 | 426,171 | 146,910 | 34,5 | Redist | 11% | 379,292 | 193,789 |
| | 7,8,9 | 387,442 | 145,557 | 37,6 | Redist | 9% | 352,572 | 180,427 |
| B3 | 1,2,3 | 282,099 | 130,475 | 46,3 | Redist | 3% | 273,636 | 138,938 |
| | 4,5,6 | 280,964 | 128,092 | 45,6 | Redist | 3% | 272,535 | 136,521 |
| | 7,8,9 | 236,588 | 81,535 | 34,5 | Redist | 11% | 210,563 | 107,560 |
| B4 | 1,2,3 | 384,466 | 157,891 | 41,1 | Redist | 6% | 361,398 | 180,959 |
| | 4,5,6 | 384,431 | 157,734 | 41,0 | Redist | 6% | 361,365 | 180,799 |
| | 7,8,9 | 346,099 | 155,622 | 45,0 | Redist | 4% | 332,255 | 169,466 |
| Ba1 | 1,2,3 | 80,542 | 56,565 | 70,2 | OK | 0% | 80,542 | 56,565 |
| | 4,5,6 | 80,558 | 56,419 | 70,0 | OK | 0% | 80,558 | 56,419 |
| | 7,8,9 | 78,548 | 55,215 | 70,3 | OK | 0% | 78,548 | 55,215 |
| Ba2 | 1,2,3 | 120,136 | 62,518 | 52,0 | OK | 0% | 120,136 | 62,518 |
| | 4,5,6 | 120,254 | 62,422 | 51,9 | OK | 0% | 120,254 | 62,422 |
| | 7,8,9 | 116,797 | 60,799 | 52,1 | OK | 0% | 116,797 | 60,799 |

Tabel 5.81 Redistribusi Momen Balok Semua Tipe Model 4

| Balok | Lantai | sebelum redistribusi | | % Momen | Kontrol | % redistribusi | setelah redistribusi | |
|-------|--------|----------------------|-----------|---------|---------|----------------|----------------------|-----------|
| | | Mu- (kNm) | Mu+ (kNm) | | | | Mu- (kNm) | Mu+ (kNm) |
| B1 | 1,2,3 | 330,336 | 145,978 | 44,2 | Redist | 4% | 317,123 | 159,191 |
| | 4,5,6 | 327,503 | 141,863 | 43,3 | Redist | 5% | 311,128 | 158,238 |
| | 7,8,9 | 274,380 | 90,932 | 33,1 | Redist | 12% | 241,455 | 123,858 |

Lanjutan Tabel 5.81 Redistribusi Momen Balok Semua Tipe Model 4

| Balok | Lantai | sebelum redistribusi | | % Momen | Kontrol | % redistribusi | setelah redistribusi | |
|-------|--------|----------------------|-----------|---------|---------|----------------|----------------------|-----------|
| | | Mu- (kNm) | Mu+ (kNm) | | | | Mu- (kNm) | Mu+ (kNm) |
| B2 | 1,2,3 | 442,965 | 145,741 | 32,9 | Redist | 12% | 389,810 | 198,897 |
| | 4,5,6 | 441,662 | 145,497 | 32,9 | Redist | 12% | 388,662 | 198,497 |
| | 7,8,9 | 391,257 | 144,190 | 36,9 | Redist | 9% | 356,044 | 179,403 |
| B3 | 1,2,3 | 297,527 | 179,192 | 60,2 | Redist | 0% | 297,527 | 179,192 |
| | 4,5,6 | 294,160 | 176,472 | 60,0 | Redist | 0% | 294,160 | 176,472 |
| | 7,8,9 | 243,501 | 109,221 | 44,9 | Redist | 4% | 233,761 | 118,961 |
| B4 | 1,2,3 | 395,456 | 155,130 | 39,2 | Redist | 8% | 363,819 | 186,766 |
| | 4,5,6 | 393,640 | 154,929 | 39,4 | Redist | 8% | 362,149 | 186,420 |
| | 7,8,9 | 350,087 | 152,636 | 43,6 | Redist | 5% | 332,582 | 170,141 |
| Ba1 | 1,2,3 | 79,069 | 55,236 | 69,9 | OK | 0% | 79,069 | 55,236 |
| | 4,5,6 | 79,068 | 55,072 | 69,7 | OK | 0% | 79,068 | 55,072 |
| | 7,8,9 | 76,999 | 53,772 | 69,8 | OK | 0% | 76,999 | 53,772 |
| Ba2 | 1,2,3 | 123,779 | 63,294 | 51,1 | OK | 0% | 123,779 | 63,294 |
| | 4,5,6 | 123,756 | 63,144 | 51,0 | OK | 0% | 123,756 | 63,144 |
| | 7,8,9 | 119,888 | 61,386 | 51,2 | OK | 0% | 119,888 | 61,386 |

5.4.2 Perhitungan Disain Tulangan Rangkap Balok

Perhitungan disain tulangan rangkap bertujuan untuk memperoleh nilai luas tulangan yang diperlukan dalam pendefinisian sendi plastis pada tahapan analisis *pushover*. Dibawah ini dicontohkan perhitungan disain tulangan rangkap pada balok 1 (B1) lantai 1 sampai 3 model 1 menggunakan momen hasil redistribusi dengan $M_u^- \text{redist} = 307,012 \text{ kNm}$ dan $M_u^+ \text{redist} = 154,550 \text{ kNm}$.

$$f'_c = 30 \text{ MPa}$$

$$\beta = 0,85 - \left(\frac{f'_c - 28}{7} \times 0,05 \right)$$

$$= 0,85 - \left(\frac{30 - 28}{7} \times 0,05 \right)$$

$$= 0,836$$

$$\epsilon_c = 0,003$$

$$f_y = 300 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_y &= \frac{f_y}{E_s} \\ &= \frac{300}{200000} \\ &= 0,0015\end{aligned}$$

Digunakan dimensi balok berdasarkan hasil *preliminary design* dengan lebar penampang (B) = 300 mm dan tinggi total penampang (Ht) = 400 mm, serta diameter tulangan pokok (\varnothing_p) = 19 mm, diameter tulangan geser (\varnothing_s) = 10 mm, selimut beton (Sb) = 40 mm, dan jarak antar tulangan minimum (s) = 25 mm.

$$\begin{aligned}A_{dp} &= \frac{1}{4} \times \pi \times \varnothing_p^2 \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 19^2 \\ &= 283,528 \text{ mm}^2 \\ A_{ds} &= \frac{1}{4} \times \pi \times \varnothing_s^2 \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 10^2 \\ &= 78,539 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

1. Parameter Tinggi Beton

$$\begin{aligned}d &= P_b + \varnothing_s + \varnothing_p + \frac{s}{2} \\ &= 40 + 10 + 19 + \frac{25}{2} \\ &= 81,5 \text{ mm} \\ d' &= P_b + \varnothing_s + \frac{\varnothing_p}{2} \\ &= 40 + 10 + \frac{19}{2} \\ &= 59,5 \text{ mm} \\ H &= H_t - d \\ &= 600 - 81,5 \\ &= 518,5 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H' &= Ht - d' \\
 &= 600 - 59,5 \\
 &= 540,5 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

2. Rasio Tulangan

$$\begin{aligned}
 m &= \frac{f_y}{0,85 \times f'_c} \\
 &= \frac{300}{0,85 \times 30} \\
 &= 11,765
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_b &= \frac{(0,85 \times f'_c)}{f_y} \times \beta \times \left(\frac{600}{(600 + f_y)} \right) \\
 &= \frac{(0,85 \times 30)}{300} \times 0,836 \times \left(\frac{600}{(600 + 400)} \right) \\
 &= 0,0473
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_m &= \frac{0,85 \times f'_c \times \beta}{\left(\frac{0,005}{0,008} + 1 \right) \times 400} \\
 &= \frac{0,85 \times 30 \times 0,836}{\left(\frac{0,005}{0,008} + 1 \right) \times 400} \\
 &= 0,0328
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_b &= \rho_b \times f_y \times (1 - (0,5 \times \rho_b \times m)) \\
 &= 0,0473 \times 300 \times (1 - (0,5 \times 0,0473 \times 11,765)) \\
 &= 10,249 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_m &= \rho_m \times f_y \times (1 - (0,5 \times \rho_m \times m)) \\
 &= 0,0328 \times 300 \times (1 - (0,5 \times 0,0328 \times 11,765)) \\
 &= 7,938 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

3. Luas tulangan sebelah

$$\begin{aligned}
 M_n &= \frac{M_u^-}{\Phi} \\
 &= \frac{307,0121}{0,9} \\
 &= 341,124 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_1 &= 0,25 \times R_b \\
 &= 0,25 \times 10,249 \\
 &= 2,0498 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_1 &= R_1 \times B \times H^2 \\
 &= 2,0498 \times 300 \times 518,5^2 \\
 &= 165328930,9 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

Dimana

$$\begin{aligned}
 M_1 &= 0,85 \times f'_c \times a \times B \times (H - a/2) \\
 165328930,9 &= 0,85 \times 30 \times a \times 300 \times (518,5 - a/2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 165328930,9 &= 3966525a - 3825a^2 \\
 3825a^2 - 3966525a + 165328930,9 &= 0 \\
 a^2 - 1037a + 43223,249 &= 0
 \end{aligned}$$

Dicari nilai a menggunakan persamaan berikut

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \\
 a &= \frac{1037 - \sqrt{1037^2 - 4 \times 1 \times 43223,249}}{2 \times 1} \\
 &= 43,506 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c &= \frac{a}{\beta} \\
 &= \frac{43,506}{0,836} \\
 &= 52,058 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_s &= \frac{d' - c}{c} \times \varepsilon_c \\
 &= \frac{59,5 - 52,058}{52,058} \times 0,003 \\
 &= 0,000432 < \varepsilon_y = 0,0015
 \end{aligned}$$

Tulangan desak belum leleh

$$T_s = C_c$$

$$A_{s1} \times f_y = 0,85 \times f'_c \times a \times B$$

$$\begin{aligned} A_{s1} &= \frac{0,85 \times f'_c \times a \times B}{f_y} \\ &= \frac{0,85 \times 30 \times 43,506 \times 300}{300} \end{aligned}$$

$$A_{s1} = 1109,411 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} n_1 &= \frac{A_{s1}}{A_{dp}} \\ &= \frac{1109,411}{283,528} \\ &= 3,913 \longrightarrow \text{dipakai 4 buah D19} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{s1} &= n_1 \times A_{dp} \\ &= 4 \times 283,528 \\ &= 1134,115 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$C_c = T_{s1}$$

$$0,85 \times f'_c \times a \times B = A_s \times f_y$$

$$\begin{aligned} a &= \frac{A_{s1} \times f_y}{0,85 \times f'_c \times B} \\ &= \frac{1134,115 \times 300}{0,85 \times 30 \times 300} \\ &= 44,475 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c &= \frac{a}{\beta} \\ &= \frac{44,475}{0,836} \\ &= 53,218 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= \frac{d' - c}{c} \times \epsilon_c \\ &= \frac{59,5 - 53,218}{53,218} \times 0,003 \\ &= 0,0003541 < \epsilon_y = 0,0015 \end{aligned}$$

Sekali lagi tulangan desak belum leleh

$$M_1 = C_c \times (h - a/2)$$

$$\begin{aligned} M_1 &= 0,85 \times f'_c \times a \times B \times (h - a/2) \\ &= 0,85 \times 30 \times 44,475 \times 300 \times (518,5 - 44,475/2) \\ &= 168845599,5 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

4. Luas tulangan kembar

$$M_n = M_1 + M_2$$

$$\begin{aligned} M_2 &= M_n - M_1 \\ &= (307,012 \times 10^6) - 168845599,5 \\ &= 172278951,6 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

Untuk sementara tulangan desak diasumsikan leleh guna menentukan jumlah tulangan kembar

$$T_{s2} = C_s$$

$$\begin{aligned} T_{s2} &= \frac{M_2}{h - d'} \\ &= \frac{172278951,6}{518,5 - 59,5} \\ &= 375335,4066 \text{ N} \end{aligned}$$

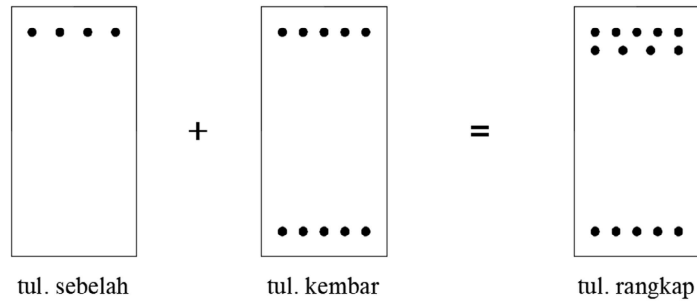
Dimana

$$T_{s2} = A_{s2} \times f_y$$

$$\begin{aligned} A_{s2} &= \frac{T_{s2}}{f_y} \\ &= \frac{375335,406}{300} \\ &= 1251,118 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_2 &= \frac{A_{s2}}{A_{dp}} \\ &= \frac{1251,118}{283,528} \\ &= 4,413 \rightarrow \text{dipakai 5 buah D19} \end{aligned}$$

Sehingga penampang tulangan diperlihatkan pada Gambar 5.36 berikut



Gambar 5.36 Penampang Balok Tulangan Rangkap

kontrol jarak antar tulangan

$$s = \frac{B - 2 \times (Sb + \text{Ø}s) - (n \times \text{Ø}p)}{n - 1}$$

$$= \frac{300 - 2 \times (40 + 10) - (5 \times 19)}{5 - 1}$$

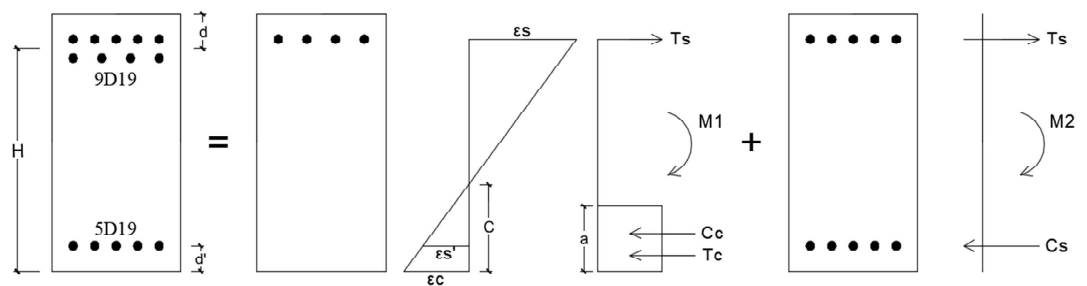
$$= 26,5 \text{ mm} > 25 \text{ mm}$$

Jarak antar tulangan memenuhi persyaratan, dengan susunan tulangan tersebut akan dianalisis apakah dapat menyediakan kuat lentur nominal memenuhi kebutuhan.

5.4.3 Kontrol Momen Nominal

1. Momen Nominal Negatif

Berikut dicontohkan perhitungan kontrol momen nominal negative penampang balok tulangan rangkap dengan asumsi tulangan desak belum leleh pada balok 1 (B1) lantai 1 sampai 3 model 1.



Gambar 5.37 Kontrol Momen Nominal Negatif

Kontrol momen nominal negative menggunakan keseimbangan gaya

$$\begin{aligned} A_{St} &= 9 \times A_{dp} \\ &= 9 \times 283,528 = 2551,758 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{S'} &= 5 \times A_{dp} \\ &= 5 \times 283,528 = 1417,644 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$T_{s1} + T_{s2} = C_c + C_s$$

$$A_{St} \times fy = (0,85 \times f'c \times a \times B) + (A'_S \times fs)$$

$$A_{St} \times fy = (0,85 \times f'c \times a \times B) + (A'_S \times (\epsilon_s \times E_s))$$

$$A_{St} \times fy = (0,85 \times f'c \times a \times B) + (A'_S \times \frac{a - \beta \times d'}{a} \times \epsilon_c \times E_s)$$

$$\begin{aligned} 2551,758 \times 300 &= (0,85 \times 30 \times a \times 300) + \\ (1417,644 \times \frac{a - (0,836 \times 59,5)}{a} \times 0,003 \times 200000 \end{aligned}$$

$$680468,968 = 7650a +$$

$$(765527,4 \times \frac{a - (0,836 \times 59,5)}{a} \times 0,003 \times 200000$$

$$7650a^2 - 85058,6211a - 42295399,34 = 0$$

$$a^2 - 11,118a - 5528,810 = 0$$

Dicari nilai a menggunakan persamaan berikut

$$a = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$= \frac{11,118 + \sqrt{11,118^2 - 4 \times 1 \times -5528,810}}{2 \times 1}$$

$$= 69,004 \text{ mm}$$

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

$$= \frac{69,004}{0,836}$$

$$= 82,569 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_s &= \frac{c - d'}{c} \times \varepsilon_c \\ &= \frac{82,569 - 59,5}{82,569} \times 0,003 \\ &= 0,000838 < \varepsilon_y = 0,0015\end{aligned}$$

Tulangan desak belum leleh

$$\begin{aligned}\varepsilon_t &= \frac{H' - c}{c} \times \varepsilon_c \\ &= \frac{540,5 - 82,569}{82,569} \times 0,003 \\ &= 0,0166 > 0,005\end{aligned}$$

Berdasarkan Pasal 9.3 SNI 2847:2013, maka digunakan nilai $\Phi = 0,9$

$$\begin{aligned}f_s &= \varepsilon_s \times E_s \\ &= 0,000838 \times 200000 \\ &= 167,634 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Momen nominal yang dapat dikerahkan

$$\begin{aligned}M_1 &= C_c \times \left(H - \frac{a}{2}\right) \\ M_1 &= (0,85 \times f'_c \times a \times B) \times \left(H - \frac{a}{2}\right) \\ &= (0,85 \times 30 \times 69,004 \times 300) \times \left(518,5 - \frac{69,004}{2}\right) \\ &= 255493580,6 \text{ Nmm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_2 &= T_s \times (H - d') \\ M_2 &= (A'_s \times f_s) \times (H - d') \\ &= (1417,644 \times 167,634) \times (518,5 - 59,5) \\ &= 109079533,4 \text{ Nmm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_n^- &= M_1 + M_2 \\ &= 255493580,6 + 109079533,4 \\ &= 364573114 \text{ Nmm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_t^- &= \frac{M_n^-}{\Phi} \\ &= \frac{364573114}{0,9} \\ &= 328115802,6 \text{ Nmm} \\ &= 328,116 \text{ kNm} > M_u^- = 307,012 \text{ kNm}\end{aligned}$$

2. Momen Nominal Positif

Tahapan perhitungan kontrol momen nominal negative sama dengan kontrol momen nominal negative namun dalam hal ini tulangan 5D19 berfungsi sebagai tulangan tarik dan tulangan 9D19 berganti fungsi menjadi tulangan desak dengan asumsi belum leleh. Berikut dicontohkan perhitungan kontrol momen nominal positif penampang balok tulangan rangkap pada balok 1 (B1) lantai 1 sampai 3 model 1.

$$\begin{aligned}
 T_{s1} + T_{s2} &= C_c + C_s \\
 A'_S \times f_y &= (0,85 \times f'_c \times a \times B) + (A_{St} \times f_s) \\
 A'_S \times f_y &= (0,85 \times f'_c \times a \times B) + (A_{St} \times (\epsilon_s \times E_s)) \\
 A'_S \times f_y &= (0,85 \times f'_c \times a \times B) + (A_{St} \times \frac{a - \beta \times d}{a} \times \epsilon_c \times E_s) \\
 1417,644 \times 300 &= (0,85 \times 30 \times a \times 300) + \\
 (2551,759 \times \frac{a - (0,836 \times 81,5)}{a} \times 0,003 \times 200000) \\
 425293,2 &= 7650a + \\
 (2551,759 \times \frac{a - (0,836 \times 81,5)}{a} \times 0,003 \times 200000) \\
 7650a^2 + 1105762,074a - 104281261,9 &= 0 \\
 a^2 + 144,544a - 13631,537 &= 0 \\
 \text{Dicari nilai } a &\text{ menggunakan persamaan berikut} \\
 a &= \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \\
 &= \frac{-144,544 + \sqrt{144,544^2 - 4 \times 1 \times -13631,537}}{2 \times 1} \\
 &= 65,041 \text{ mm} \\
 c &= \frac{a}{\beta} \\
 &= \frac{65,041}{0,836} \\
 &= 77,826 \text{ mm} \\
 \epsilon_s &= \frac{c - d}{c} \times \epsilon_c
 \end{aligned}$$

$$= \frac{77,826 - 81,5}{77,826} \times 0,003$$

$$= 0,000142 < \varepsilon_y = 0,0015$$

Tulangan desak belum leleh

$$\varepsilon_t = \frac{H - c}{c} \times \varepsilon_c$$

$$= \frac{518,5 - 77,826}{77,826} \times 0,003$$

$$= 0,0169 > 0,005$$

Berdasarkan Pasal 9.3 SNI 2847:2013, maka digunakan nilai $\Phi = 0,009$

$$f_s = \varepsilon_s \times E_s$$

$$= 0,000142 \times 200000$$

$$= 28,32 \text{ MPa}$$

Momen nominal yang dapat dikerahkan

$$M_1 = C_c \times \left(H - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_1 = (0,85 \times f'_c \times a \times B) \times \left(H' - \frac{a}{2}\right)$$

$$= (0,85 \times 30 \times 65,0410 \times 300) \times \left(540,5 - \frac{65,041}{2}\right)$$

$$= 252751014,8 \text{ Nmm}$$

$$M_2 = T_s \times (H' - d)$$

$$M_2 = (A_{st} \times f_s) \times (H' - d)$$

$$= (2551,758 \times 28,32) \times (540,5 - 81,5)$$

$$= 33171099,35 \text{ Nmm}$$

$$M_n^+ = M_1 + M_2$$

$$= 252751014,8 + 33171099,35$$

$$= 285922114,2 \text{ Nmm}$$

$$M_t^+ = \frac{M_n^+}{\Phi}$$

$$= \frac{285922114,2}{0,9}$$

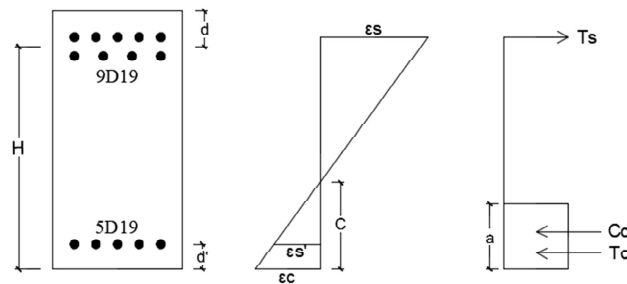
$$= 257329902,7 \text{ Nmm}$$

$$= 257,329 \text{ kNm} > M_u^+ = 154,55 \text{ kNm}$$

5.4.4 Kontrol Momen Kapasitas

1. Momen Kapasitas Negatif

Berikut dicontohkan perhitungan kontrol momen kapasitas negative penampang balok tulangan rangkap dengan asumsi tulangan desak sudah leleh pada balok 1 (B1) lantai 1 sampai 3 model 1.



Gambar 5.38 Kontrol Momen Kapasitas Negatif

Kontrol momen nominal negatif menggunakan keseimbangan gaya-gaya

$$A_{St} = 9 \times A_{dp}$$

$$= 9 \times 283,528 = 2551,758 \text{ mm}^2$$

$$A_{S'} = 3 \times A_{dp}$$

$$= 5 \times 283,528 = 1417,644 \text{ mm}^2$$

$$T_s = C_c + C_s$$

$$A_{St} \times f_y \times \phi_0 = (0,85 \times f'_c \times a \times B) + (A_{S'} \times f_y)$$

$$2551,758 \times 300 \times 1,25 = (0,85 \times 30 \times a \times 300) + (1417,644 \times 300)$$

$$a = \frac{956909,487 - 425293,105}{7650}$$

$$= 69,492 \text{ mm}$$

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

$$= \frac{69,492}{0,836}$$

$$= 83,153 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_s &= \frac{c - d'}{c} \times \varepsilon_c \\ &= \frac{83,153 - 59,5}{83,153} \times 0,003 \\ &= 0,00085 < \varepsilon_y = 0,0015\end{aligned}$$

Tulangan desak belum leleh maka perlu di cek kembali keseimbangan gaya

$$T_s = C_c + C_s$$

$$A_{St} \times f_y \times \emptyset_0 = (0,85 \times f'_c \times a \times B) + (A'_S \times f_s)$$

$$A_{St} \times f_y \times \emptyset_0 = (0,85 \times f'_c \times a \times B) + (A'_S \times (\varepsilon_s \times E_s))$$

$$A_{St} \times f_y \times \emptyset_0 = (0,85 \times f'_c \times a \times B) + (A'_S \times \frac{a - \beta \times d'}{a} \times \varepsilon_c \times E_s)$$

$$2551,758 \times 300 \times 1,25 = (0,85 \times 30 \times a \times 300) +$$

$$(1417,644 \times \frac{a - (0,836 \times 59,5)}{a} \times 0,003 \times 200000)$$

$$956909,25 = 7650a +$$

$$(1417,644 \times \frac{a - (0,836 \times 59,5)}{a} \times 0,003 \times 200000)$$

$$7650a^2 - 106323,2764a - 42295399,34 = 0$$

$$a^2 - 13,898a - 5528,810 = 0$$

Dicari nilai a menggunakan persamaan berikut

$$a = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$= \frac{13,898 + \sqrt{13,898^2 - 4 \times 1 \times -5528,810}}{2 \times 1}$$

$$= 81,629 \text{ mm}$$

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

$$= \frac{81,629}{0,836}$$

$$= 97,676 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s = \frac{c - d'}{c} \times \varepsilon_c$$

$$= \frac{97,676 - 59,5}{97,676} \times 0,003$$

$$= 0,001172 < \varepsilon_y = 0,0015$$

Tulangan desak belum leleh

$$\begin{aligned} f_s &= \varepsilon_s \times E_s \\ &= 0,001172 \times 200000 \\ &= 234,506 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Momen kapasitas yang dapat dikerahkan

$$M_1 = C_c \times \left(H - \frac{a}{2}\right)$$

$$\begin{aligned} M_1 &= (0,85 \times f'_c \times a \times B) \times \left(H - \frac{a}{2}\right) \\ &= (0,85 \times 30 \times 81,629 \times 300) \times \left(518,5 - \frac{81,629}{2}\right) \\ &= 298297148,2 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$M_2 = T_s \times (H - d')$$

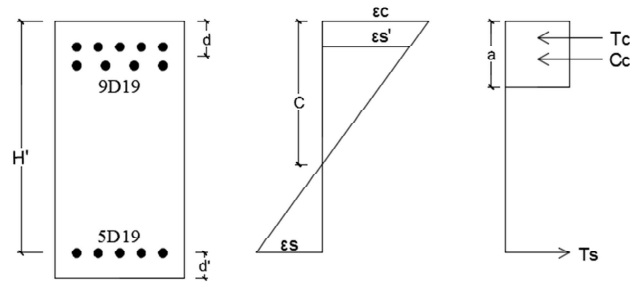
$$\begin{aligned} M_2 &= (A'_s \times f_s) \times (H - d') \\ &= (1417,644 \times 234,506) \times (518,5 - 59,5) \\ &= 152592649 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$M_{\text{kap}}^- = M_1 + M_2$$

$$\begin{aligned} &= 298297148,2 + 152592649 \\ &= 450889797,2 \text{ Nmm} \\ &= 450,889 \text{ kNm} > M_u^- = 307,012 \text{ kNm} \end{aligned}$$

2. Momen Kapasitas Positif

Berikut dicontohkan perhitungan kontrol momen kapasitas positif penampang balok tulangan rangkap pada balok 1 (B1) lantai 1 sampai 3 model 1 dalam hal ini tulangan 5D19 berfungsi sebagai tulangan Tarik dan tulangan 9D19 berganti fungsi menjadi tulangan desak.



Gambar 5.39 Kontrol Momen Kapasitas Positif

$$T_s = C_c + C_s$$

$$A'_S \times f_y \times \varnothing_0 = (0,85 \times f'_c \times a \times B) + (A_{St} \times f_s)$$

$$A'_S \times f_y \times \varnothing_0 = (0,85 \times f'_c \times a \times B) + (A_{St} \times (\epsilon_s \times E_s))$$

$$A'_S \times f_y \times \varnothing_0 = (0,85 \times f'_c \times a \times B) + (A_{St} \times \frac{a - \beta \times d}{a} \times \epsilon_c \times E_s)$$

$$1417,644 \times 300 \times 1,25 = (0,85 \times 30 \times a \times 300) +$$

$$(2551,758 \times \frac{a - (0,836 \times 81,5)}{a} \times 0,003 \times 200000)$$

$$531616,382 = 7650a +$$

$$(2551,758 \times \frac{a - (0,836 \times 81,5)}{a} \times 0,003 \times 200000)$$

$$7650a^2 + 999438,798 - 104281261,9 = 0$$

$$a^2 + 130,645a - 13631,537 = 0$$

Dicari nilai a menggunakan persamaan berikut

$$a = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$= \frac{-130,645 + \sqrt{130,645^2 - 4 \times 1 \times -13631,537}}{2 \times 1}$$

$$= 68,463 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
 c &= \frac{a}{\beta} \\
 &= \frac{68,463}{0,836} \\
 &= 81,921 \text{ mm} \\
 \varepsilon_s &= \frac{c - d}{c} \times \varepsilon_c \\
 &= \frac{81,921 - 81,5}{81,921} \times 0,003 \\
 &= 0,0000154 < \varepsilon_y = 0,0015
 \end{aligned}$$

Tulangan desak belum leleh

$$\begin{aligned}
 f_s &= \varepsilon_s \times E_s \\
 &= 0,000331 \times 200000 \\
 &= 3,086 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Momen nominal yang dapat dikerahkan

$$\begin{aligned}
 M_1 &= C_c \times \left(H - \frac{a}{2}\right) \\
 M_1 &= (0,85 \times f'_c \times a \times B) \times \left(H' - \frac{a}{2}\right) \\
 &= (0,85 \times 30 \times 68,463 \times 300) \times \left(540,5 - \frac{68,463}{2}\right) \\
 &= 265153589,8 \text{ Nmm} \\
 M_2 &= T_s \times (H' - d) \\
 M_2 &= (A_{st} \times f_s) \times (H' - d) \\
 &= (2551,759 \times 3,086) \times (540,5 - 81,5) \\
 &= 3614813,044 \text{ Nmm} \\
 M_{kap}^+ &= M_1 + M_2 \\
 &= 265153589,8 + 3614813,044 \\
 &= 268768402,9 \text{ Nmm} \\
 &= 268,768 \text{ kNm} > M_u^+ = 154,550 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Perhitungan disain tulangan rangkap pada balok dan model lain dilakukakn dengan cara yang sama dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 5.82 hingga Tabel 5.85.

Tabel 5.82 Disain Tulangan Rangkap Balok pada Model 1

| Balok | Lantai | Momen Ultimit | | Jumlah Tulangan | | Momen Tersedia | | Momen Kapasitas | |
|-------|--------|---------------|-----------|-----------------|------|----------------|-----------|-----------------|-------------|
| | | Mu- (kNm) | Mu+ (kNm) | Ast | As' | Mt- (kNm) | Mt+ (kNm) | Mkap- (kNm) | Mkap+ (kNm) |
| B1 | 1,2,3 | 307,01 | 154,55 | 9D19 | 5D19 | 328,12 | 257,33 | 450,89 | 268,77 |
| | 4,5,6 | 312,07 | 160,41 | 9D19 | 5D19 | 328,12 | 257,33 | 450,89 | 268,77 |
| | 7,8,9 | 237,34 | 118,78 | 7D19 | 3D19 | 258,10 | 286,06 | 354,25 | 303,62 |
| B2 | 1,2,3 | 391,69 | 198,18 | 9D19 | 5D19 | 421,16 | 250,74 | 576,82 | 342,41 |
| | 4,5,6 | 388,21 | 197,31 | 9D19 | 5D19 | 421,16 | 250,74 | 576,82 | 342,41 |
| | 7,8,9 | 349,76 | 177,37 | 8D19 | 4D19 | 376,00 | 252,26 | 514,85 | 278,61 |
| B3 | 1,2,3 | 269,56 | 135,40 | 6D19 | 3D19 | 285,98 | 266,04 | 392,25 | 280,64 |
| | 4,5,6 | 265,57 | 134,93 | 6D19 | 3D19 | 285,98 | 266,04 | 392,25 | 280,64 |
| | 7,8,9 | 205,10 | 105,84 | 5D19 | 3D19 | 240,58 | 260,13 | 330,28 | 276,75 |
| B4 | 1,2,3 | 349,43 | 177,19 | 8D19 | 4D19 | 376,00 | 252,26 | 514,85 | 278,61 |
| | 4,5,6 | 349,97 | 177,13 | 8D19 | 4D19 | 376,00 | 252,26 | 514,85 | 278,61 |
| | 7,8,9 | 323,13 | 165,61 | 7D19 | 4D19 | 331,32 | 250,53 | 454,57 | 278,62 |
| Ba1 | 1,2,3 | 76,59 | 53,33 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |
| | 4,5,6 | 76,68 | 53,24 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |
| | 7,8,9 | 74,84 | 52,05 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |
| Ba2 | 1,2,3 | 127,90 | 64,60 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |
| | 4,5,6 | 127,55 | 64,32 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |
| | 7,8,9 | 122,92 | 62,25 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |

Tabel 5.83 Disain Tulangan Rangkap Balok pada Model 2

| Balok | Lantai | Momen Ultimit | | Jumlah Tulangan | | Momen Tersedia | | Momen Kapasitas | |
|-------|--------|---------------|-----------|-----------------|------|----------------|-----------|-----------------|-------------|
| | | Mu- (kNm) | Mu+ (kNm) | Ast | As' | Mt- (kNm) | Mt+ (kNm) | Mkap- (kNm) | Mkap+ (kNm) |
| B1 | 1,2,3 | 300,91 | 154,02 | 9D19 | 5D19 | 328,12 | 257,33 | 450,89 | 268,77 |
| | 4,5,6 | 301,31 | 153,23 | 9D19 | 5D19 | 328,12 | 257,33 | 450,89 | 268,77 |
| | 7,8,9 | 245,73 | 123,69 | 7D19 | 4D19 | 258,14 | 269,15 | 354,67 | 281,67 |
| B2 | 1,2,3 | 386,12 | 194,21 | 9D19 | 5D19 | 421,16 | 250,74 | 576,82 | 342,41 |
| | 4,5,6 | 388,01 | 194,36 | 9D19 | 5D19 | 421,16 | 250,74 | 576,82 | 342,41 |
| | 7,8,9 | 359,28 | 181,04 | 8D19 | 4D19 | 376,00 | 252,26 | 514,85 | 278,61 |
| B3 | 1,2,3 | 292,64 | 146,71 | 7D19 | 4D19 | 331,32 | 250,53 | 454,57 | 278,62 |
| | 4,5,6 | 285,29 | 143,79 | 6D19 | 3D19 | 285,98 | 266,04 | 392,25 | 280,64 |
| | 7,8,9 | 215,32 | 108,87 | 5D19 | 3D19 | 240,58 | 260,13 | 330,28 | 276,75 |

Lanjutan Tabel 5.83 Disain Tulangan Rangkap Balok pada Model 2

| Balok | Lantai | Momen Ultimit | | Jumlah Tulangan | | Momen Tersedia | | Momen Kapasitas | |
|-------|--------|---------------|--------------|-----------------|------|----------------|--------------|-----------------|----------------|
| | | Mu- (kNm) | Mu+ (kNm) | Ast | As' | Mt- (kNm) | Mt+ (kNm) | Mkap- (kNm) | Mkap+ (kNm) |
| B4 | 1,2,3 | 370,20 | 190,80 | 8D19 | 4D19 | 376,00 | 252,26 | 514,85 | 278,61 |
| | 4,5,6 | 370,95 | 186,24 | 8D19 | 4D19 | 376,00 | 252,26 | 514,85 | 278,61 |
| | 7,8,9 | 336,21 | 169,89 | 8D19 | 4D19 | 376,00 | 252,26 | 514,85 | 278,61 |
| Ba1 | 1,2,3 | 80,94 | 56,82 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |
| | 4,5,6 | 80,85 | 56,59 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |
| | 7,8,9 | 78,58 | 55,19 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |
| Ba2 | 1,2,3 | 119,41 | 62,02 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |
| | 4,5,6 | 119,71 | 62,00 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |
| | 7,8,9 | 116,80 | 60,61 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |

Tabel 5.84 Disain Tulangan Rangkap Balok pada Model 3

| Balok | Lantai | Momen Ultimit | | Jumlah Tulangan | | Momen Tersedia | | Momen Kapasitas | |
|-------|--------|---------------|--------------|-----------------|------|----------------|--------------|-----------------|----------------|
| | | Mu- (kNm) | Mu+ (kNm) | Ast | As' | Mt- (kNm) | Mt+ (kNm) | Mkap- (kNm) | Mkap+ (kNm) |
| B1 | 1,2,3 | 283,71 | 144,78 | 8D19 | 4D19 | 293,12 | 272,89 | 402,57 | 283,99 |
| | 4,5,6 | 281,89 | 144,23 | 8D19 | 4D19 | 293,12 | 272,89 | 402,57 | 283,99 |
| | 7,8,9 | 234,18 | 120,03 | 7D19 | 4D19 | 258,14 | 269,15 | 354,67 | 281,67 |
| B2 | 1,2,3 | 377,00 | 193,68 | 8D19 | 4D19 | 376,00 | 252,26 | 514,85 | 278,61 |
| | 4,5,6 | 379,29 | 193,79 | 9D19 | 5D19 | 421,16 | 250,74 | 576,82 | 342,41 |
| | 7,8,9 | 352,57 | 180,43 | 8D19 | 4D19 | 376,00 | 252,26 | 514,85 | 278,61 |
| B3 | 1,2,3 | 273,64 | 138,94 | 6D19 | 3D19 | 285,98 | 266,04 | 392,25 | 280,64 |
| | 4,5,6 | 272,53 | 136,52 | 6D19 | 3D19 | 285,98 | 266,04 | 392,25 | 280,64 |
| | 7,8,9 | 210,56 | 107,56 | 5D19 | 3D19 | 240,58 | 260,13 | 330,28 | 276,75 |
| B4 | 1,2,3 | 361,40 | 180,96 | 8D19 | 4D19 | 376,00 | 252,26 | 514,85 | 278,61 |
| | 4,5,6 | 361,37 | 180,80 | 8D19 | 4D19 | 376,00 | 252,26 | 514,85 | 278,61 |
| | 7,8,9 | 332,26 | 169,47 | 8D19 | 4D19 | 376,00 | 252,26 | 514,85 | 278,61 |
| Ba1 | 1,2,3 | 80,54 | 56,56 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |
| | 4,5,6 | 80,56 | 56,42 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |
| | 7,8,9 | 78,55 | 55,21 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |
| Ba2 | 1,2,3 | 120,14 | 62,52 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |
| | 4,5,6 | 120,25 | 62,42 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |
| | 7,8,9 | 116,80 | 60,61 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |

Tabel 5.85 Disain Tulangan Rangkap Balok pada Model 4

| Balok | Lantai | Momen Ultimit | | Jumlah Tulangan | | Momen Tersedia | | Momen Kapasitas | |
|-------|--------|---------------|--------------|-----------------|------|----------------|--------------|-----------------|----------------|
| | | Mu- (kNm) | Mu+ (kNm) | Ast | As' | Mt- (kNm) | Mt+ (kNm) | Mkap- (kNm) | Mkap+ (kNm) |
| B1 | 1,2,3 | 317,12 | 159,19 | 9D19 | 5D19 | 328,12 | 257,33 | 450,89 | 268,77 |
| | 4,5,6 | 311,13 | 158,24 | 9D19 | 5D19 | 328,12 | 257,33 | 450,89 | 268,77 |
| | 7,8,9 | 241,45 | 123,86 | 7D19 | 4D19 | 258,14 | 269,15 | 354,67 | 281,67 |
| B2 | 1,2,3 | 389,81 | 198,90 | 9D19 | 5D19 | 421,16 | 250,74 | 576,82 | 342,41 |
| | 4,5,6 | 388,66 | 198,50 | 9D19 | 5D19 | 421,16 | 250,74 | 576,82 | 342,41 |
| | 7,8,9 | 356,04 | 179,40 | 8D19 | 4D19 | 376,00 | 252,26 | 514,85 | 278,61 |
| B3 | 1,2,3 | 297,53 | 179,19 | 7D19 | 4D19 | 331,32 | 250,53 | 454,57 | 278,62 |
| | 4,5,6 | 294,16 | 176,47 | 7D19 | 4D19 | 331,32 | 250,53 | 454,57 | 278,62 |
| | 7,8,9 | 233,76 | 118,96 | 5D19 | 3D19 | 240,58 | 260,13 | 330,28 | 276,75 |
| B4 | 1,2,3 | 363,82 | 186,77 | 8D19 | 4D19 | 376,00 | 252,26 | 514,85 | 278,61 |
| | 4,5,6 | 362,15 | 186,42 | 8D19 | 4D19 | 376,00 | 252,26 | 514,85 | 278,61 |
| | 7,8,9 | 332,58 | 170,14 | 8D19 | 4D19 | 376,00 | 252,26 | 514,85 | 278,61 |
| Ba1 | 1,2,3 | 79,07 | 55,24 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |
| | 4,5,6 | 79,07 | 55,07 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |
| | 7,8,9 | 77,00 | 53,77 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |
| Ba2 | 1,2,3 | 123,78 | 63,29 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |
| | 4,5,6 | 123,76 | 63,14 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |
| | 7,8,9 | 119,89 | 61,39 | 4D19 | 2D19 | 153,06 | 178,72 | 209,36 | 191,67 |

5.5 Perencanaan Kolom

5.5.1 Momen Lentur dan Beban Aksial

Gaya- gaya dalam pada kolom hasil analisis struktur menggunakan ETABS 2013 berupa gaya aksial, momen lentur terhadap sumbu x dan sumbu y, serta gaya geser dapat dilihat pada Tabel 5.86 berikut.

Tabel 5.86 Gaya-gaya Dalam Kolom Hasil Analisis

| Model | Lantai | Gaya-gaya dalam | | | |
|---------|--------|-----------------|------------|-------------|---------|
| | | Pu (kN) | Mu -2(kNm) | Mu -3 (kNm) | Vu (kN) |
| Model 1 | 1,2,3 | 8573,04 | 826,22 | 1130,16 | 131,98 |
| | 4,5,6 | 5594,13 | 412,38 | 459,39 | 114,36 |
| | 7,8,9 | 2614,27 | 397,36 | 445,43 | 79,54 |
| Model 2 | 1,2,3 | 8582,94 | 763,12 | 1302,48 | 143,90 |
| | 4,5,6 | 5597,76 | 372,85 | 504,86 | 121,38 |
| | 7,8,9 | 2615,93 | 358,10 | 484,37 | 86,52 |
| Model 3 | 1,2,3 | 8578,82 | 548,34 | 1179,50 | 146,99 |
| | 4,5,6 | 5597,97 | 323,20 | 485,28 | 118,68 |
| | 7,8,9 | 2616,01 | 316,29 | 471,07 | 85,09 |
| Model 4 | 1,2,3 | 8575,72 | 1054,38 | 951,50 | 135,73 |
| | 4,5,6 | 5595,93 | 459,26 | 411,13 | 118,70 |
| | 7,8,9 | 2615,08 | 441,08 | 413,49 | 84,00 |

5.5.2 Kontrol Persyaratan Disain

Kolom yang akan didisain tulangnya adalah kolom persegi panjang dan kolom bujur sangkar. Sebelumnya kolom harus dikontrol terhadap persyaratan disain sesuai Pasal 21.6.1 SNI 2847:2013. Dibawah ini kontrol persyaratan disain kolom persegi panjang yang digunakan pada model 1, model 2, dan model 3, serta kolom bujur sangkar yang digunakan pada model 4.

Digunakan dimensi kolom berdasarkan hasil *preliminary*, untuk kolom bujur sangkar dengan dimensi B = 930 mm dan H = 930 mm sedangkan untuk kolom persegi panjang dengan dimensi B = 755 mm dan H = 1116 mm. sedangkan untuk data material yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$f'_c = 30 \text{ MPa}$$

$$\beta = 0,836$$

$$\varepsilon_c = 0,003$$

$$f_y = 300 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = 0,0015$$

Diameter tulangan yang digunakan untuk tulangan pokok (\varnothing_p) = 22 mm, diameter tulangan geser (\varnothing_s) = 10 mm, selimut beton (S_b) = 40 mm, dan jarak antar tulangan minimum (s) = 25 mm.

$$\begin{aligned} A_{dp} &= \frac{1}{4} \times \pi \times \varnothing_p^2 \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 22^2 \\ &= 380,133 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{ds} &= \frac{1}{4} \times \pi \times \varnothing_s^2 \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 10^2 \\ &= 78,539 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Dari analisis ETABS 2013 diperoleh besarnya gaya yang terjadi pada kolom K1 lantai 1 sampai 3 sebagai berikut.

a) Kolom persegi panjang

$$P_u = 8573,04 \text{ kN}$$

$$M_{u2} = 826,22 \text{ kNm}$$

$$M_{u3} = 1130,16 \text{ kNm}$$

$$V_u = 131,983 \text{ kN}$$

$$\Delta_0 = 3 \text{ mm}$$

b) Kolom bujur sangkar

$$P_u = 8575,72 \text{ kN}$$

$$M_{u2} = 1054,38 \text{ kNm}$$

$$M_{u3} = 951,50 \text{ kNm}$$

$$V_u = 135,7298 \text{ kN}$$

$$\Delta_0 = 2,85 \text{ mm}$$

Persyaratan disain yang harus dipenuhi oleh kolom persegi panjang dan bujur sangkar adalah sebagai berikut.

1. Persyaratan Geometri

Persyaratan geometri yang harus dipenuhi sesuai Pasal 21.6.1 SNI 2847:2013 adalah sebagai berikut.

Gaya tekan aksial (P_u) tidak kurang dari persamaan $A_g \times f'_c / 10$

a. Kolom persegi panjang

$$\frac{A_g \times f'_c}{10} \leq P_u$$

$$\frac{(755 \times 1116) \times (30 \times 10^{-3})}{10} \leq 8573,04 \text{ kN}$$

$$2594,7 \leq 8573,04$$

b. Kolom bujur sangkar

$$\frac{A_g \times f'_c}{10} \leq P_u$$

$$\frac{(930 \times 930) \times (30 \times 10^{-3})}{10} \leq 8575,72 \text{ kN}$$

$$2594,7 \leq 8575,72$$

Dimensi penampang terpendek tidak kurang dari 300 mm

a. Kolom persegi panjang

$$300 \text{ mm} \leq B_{\text{persegi panjang}}$$

$$300 \text{ mm} \leq 755 \text{ mm}$$

b. Kolom bujur sangkar

$$300 \text{ mm} \leq B_{\text{bujur sangkar}}$$

$$300 \text{ mm} \leq 930 \text{ mm}$$

Rasio dimensi penampang terpendek terhadap dimensi tegak lurus tidak boleh kurang dari 0,4

a. Kolom persegi panjang

$$0,4 \leq \frac{B}{H}$$

$$0,4 \leq \frac{755}{1116}$$

$$0,4 \leq 0,694$$

b. Kolom bujur sangkar

$$0,4 \leq \frac{B}{H}$$

$$0,4 \leq \frac{930}{930}$$

$$0,4 \leq 1$$

2. Indeks Stabilitas

Kolom dan tingkat pada struktur boleh dianggap sebagai kolom atau tingkat tidak bergoyang apabila memenuhi persamaan pada Pasal 10.10.5.2 SNI 2847:2013 sebagai berikut.

a. Kolom persegi panjang

$$\begin{aligned} Q &= \frac{P_u \times \Delta_0}{V_u \times l_c} \leq 0,05 \\ &= \frac{8573,04 \times 3 \times 10^{-3}}{131,983 \times 3,9} \\ &= 0,0496 \leq 0,05 \end{aligned}$$

Kolom persegi panjang boleh dianggap sebagai kolom tidak bergoyang

b. Kolom bujur sangkar

$$\begin{aligned} Q &= \frac{P_u \times \Delta_0}{V_u \times l_c} \leq 0,05 \\ &= \frac{8575,72 \times 2,85 \times 10^{-3}}{135,7298 \times 3,9} \\ &= 0,04617 \leq 0,05 \end{aligned}$$

Kolom bujur sangkar boleh dianggap sebagai kolom tidak bergoyang

3. Faktor Panjang Efektif Kolom

a. Kolom persegi panjang

Terlebih dulu dicari nilai momen inersia kolom (I_k) dan balok (I_b) sesuai Pasal 10.10.4.1 SNI 2847:2013 serta nilai modulus elastisitas beton.

Inersia kolom

$$\begin{aligned} E &= 4700 \times \sqrt{f'_c} \\ &= 4700 \times \sqrt{30} \\ &= 25742,9602 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$L_k = 3900 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} I_{kx} &= 0,7 \times \frac{1}{12} \times B \times H^3 \\ &= 0,7 \times \frac{1}{12} \times 775 \times 1116^3 \\ &= 6,283 \times 10^{10} \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} EI_{kx} &= 25742,9602 \times 6,283 \times 10^{10} \\ &= 1,617 \times 10^{15} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{EI_{kx}}{L_k} &= \frac{1,617 \times 10^{15}}{3900} \\ &= 4,147 \times 10^{11} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{ky} &= 0,7 \times \frac{1}{12} \times B \times H^3 \\ &= 0,7 \times \frac{1}{12} \times 1116 \times 775^3 \\ &= 3,030 \times 10^{10} \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} EI_{ky} &= 25742,9602 \times 3,030 \times 10^{10} \\ &= 7,80 \times 10^{14} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{EI_{ky}}{L_k} &= \frac{7,80 \times 10^{14}}{3900} \\ &= 2,0023 \times 10^{11} \end{aligned}$$

Inersia Balok.

$$L_b = 7200 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} I_b &= 0,35 \times \frac{1}{12} \times B \times H^3 \\ &= 0,35 \times \frac{1}{12} \times 300 \times 600^3 \\ &= 1,89 \times 10^9 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} EI_b &= 25742,9602 \times 1,89 \times 10^9 \\ &= 4,865 \times 10^{14} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{EI_{kb}}{L_b} &= \frac{4,865 \times 10^{14}}{7200} \\ &= 6,758 \times 10^9\end{aligned}$$

Faktor panjang efektif kolom

$$\begin{aligned}\Psi_A &= \frac{\sum \frac{EI_k}{L_k}}{\sum \frac{EI_b}{L_b}} \\ &= \frac{(4,147 \times 10^{11}) + (2,0023 \times 10^{11})}{(6,758 \times 10^9) + (6,758 \times 10^9)} \\ &= 45,489\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Psi_B &= \Psi_A \\ &= 45,489\end{aligned}$$

Nilai Ψ_A dan Ψ_B dilihat dari struktur tak bergoyang berdasarkan Pasal 10.10.7.2 SNI 2847:2013 sehingga diperoleh nilai $k = 0,98$.

b. Kolom bujur sangkar

$$\begin{aligned}I_{kx} &= 0,7 \times \frac{1}{12} \times B \times H^3 \\ &= 0,7 \times \frac{1}{12} \times 930 \times 930^3 \\ &= 4,363 \times 10^{10} \text{ mm}^4\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}EI_{kx} &= 25742,9602 \times 4,363 \times 10^{10} \\ &= 1,123 \times 10^{15}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{EI_{kx}}{L_k} &= \frac{1,123 \times 10^{15}}{3900} \\ &= 2,880 \times 10^{11}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}I_{ky} &= I_{kx} \\ &= 4,363 \times 10^{10} \text{ mm}^4\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}EI_{ky} &= EI_{kx} \\ &= 1,123 \times 10^{15}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{EI_{ky}}{L_k} &= \frac{1,123 \times 10^{15}}{3900} \\ &= 2,880 \times 10^{11}\end{aligned}$$

Inersia Balok

$$L_b = 7200 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} I_b &= 0,35 \times \frac{1}{12} \times B \times H^3 \\ &= 0,35 \times \frac{1}{12} \times 300 \times 600^3 \\ &= 1,89 \times 10^9 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} EI_b &= 25742,9602 \times 1,89 \times 10^9 \\ &= 4,865 \times 10^{14} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{EI_{kb}}{L_b} &= \frac{4,865 \times 10^{14}}{7200} \\ &= 6,758 \times 10^9 \end{aligned}$$

Faktor panjang efektif kolom

$$\begin{aligned} \Psi_A &= \frac{\sum \frac{EI_k}{L_k}}{\sum \frac{EI_b}{L_b}} \\ &= \frac{(2,880 \times 10^{11}) + (2,880 \times 10^{11})}{(6,758 \times 10^9) + (6,758 \times 10^9)} \\ &= 42,624 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Psi_B &= \Psi_A \\ &= 42,624 \end{aligned}$$

Nilai Ψ_A dan Ψ_B dilihat dari struktur tak bergoyang berdasarkan Pasal 10.10.7.2 SNI 2847:2013 sehingga diperoleh nilai $k = 0,96$.

4. Kontrol Kelangsingan Kolom

Menurut SNI 2847:2013 Pasal 10.10.1 pada komponen struktur yang tidak ditahan terhadap goyangan samping, pengaruh kelangsingan boleh diabaikan jika nilai $\frac{k \times L_u}{r} \leq 22$ dimana nilai r merupakan radius girasi kolom yang nilainya sebesar 0,3 kali dimensi keseluruhan dalam arah stabilitas yang ditinjau.

a. Kolom persegi panjang

$$\begin{aligned} r &= 0,3 \times H_{\text{kolom}} \\ &= 0,3 \times 1116 \\ &= 334,8 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_u &= L_k - H_{\text{balok}} \\ &= 3900 - 600 \\ &= 3300 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{k \times L_u}{r} &\leq 22 \\ \frac{0,98 \times 3300}{334,8} &\leq 22 \\ 9,659 &\leq 22 \end{aligned}$$

Maka, pengaruh kelangsingan pada kolom persegi panjang model 1 boleh diabaikan, untuk kontrol kelangsingan pada kolom persegi panjang pada model 2 dan model 3 dianggap sama dengan model 1.

b. Kolom bujur sangkar

$$\begin{aligned} r &= 0,3 \times H_{\text{kolom}} \\ &= 0,3 \times 930 \\ &= 279 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_u &= L_k - H_{\text{balok}} \\ &= 3900 - 600 \\ &= 3300 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{k \times L_u}{r} &\leq 22 \\ \frac{0,96 \times 3300}{279} &\leq 22 \\ 11,355 &\leq 22 \end{aligned}$$

Maka, pengaruh kelangsingan pada kolom bujur sangkar model 4 boleh diabaikan.

5.5.3 Diagram Interaksi

Diagram interaksi menunjukkan kondisi kekuatan gaya aksial (P_n) dan kekuatan momen lentur penampang (M_n) penampang kolom pada beberapa kondisi kerusakan. Dibawah ini perhitungan diagram interaksi kolom persegi panjang yang ditinjau pada momen terhadap arah 2.

$$f'_c = 30 \text{ MPa}$$

$$\beta = 0,836$$

$$\varepsilon_c = 0,003$$

$$f_y = 300 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = 0,0015$$

Digunakan dimensi kolom persegi panjang berdasarkan hasil *preliminary design* dengan lebar penampang (B) = 775 mm dan tinggi total penampang (H_t) = 1116 mm, serta diameter tulangan pokok (\varnothing_p) = 22 mm, diameter tulangan geser (\varnothing_s) = 10 mm, selimut beton (S_b) = 40 mm, dan jarak antar tulangan minimum (s) = 25 mm.

$$\begin{aligned} A_g &= B \times H_t \\ &= 775 \times 1116 \\ &= 864900 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{dp} &= \frac{1}{4} \times \pi \times \varnothing_p^2 \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 22^2 \\ &= 380,133 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{ds} &= \frac{1}{4} \times \pi \times \varnothing_s^2 \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 10^2 \\ &= 78,539 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Parameter Tinggi Beton

$$d = P_b + \emptyset_s + \emptyset_p/2$$

$$= 40 + 10 + 22/2$$

$$= 61 \text{ mm}$$

$$d' = d$$

$$= 61 \text{ mm}$$

$$H = H_t - d$$

$$= 1116 - 61$$

$$= 1055 \text{ mm}$$

$$H' = H_t - d'$$

$$= 1116 - 61$$

$$= 1055 \text{ mm}$$

Luas tulangan memanjang (A_{st}) tidak boleh kurang dari $0,01A_g$ dan tidak lebih dari $0,06A_g$, maka dicoba menggunakan jumlah tulangan sebanyak 24 buah.

$$A_{st} = n \times A_{dp}$$

$$= 24 \times 380,133$$

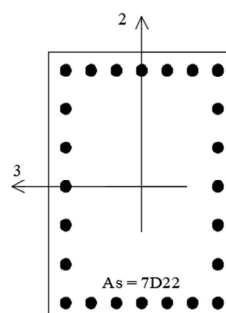
$$= 9123,19 \text{ mm}^2$$

$$(0,01 \times A_g) \leq A_{st} \leq (0,06 \times A_g)$$

$$(0,01 \times 864900) \leq 9123,19 \leq (0,06 \times 864900)$$

$$8649,00 \leq 9123,19 \leq 51894,00$$

Jumlah tulangan memenuhi persyaratan. sehingga untuk selanjutnya akan dianalisis penampang kolom dalam berbagai kondisi kerusakan dengan jumlah tulangan tiap sisi sebanyak 7 buah.



Gambar 5.40 Konfigurasi Tulangan Penampang Kolom Persegi Panjang

$$\begin{aligned}
 A_s &= n \times A_{dp} \\
 &= 7 \times 380,133 \\
 &= 2660,928 \text{ mm}^2 \\
 A'_s &= A_s \\
 &= 2660,928 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

1. Kondisi *Balance*

$$\begin{aligned}
 C_b &= \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_y} \times H \\
 &= \frac{0,003}{0,003 + 0,0015} \times 1055 \\
 &= 703,333 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_b &= C_b \times \beta \\
 &= 703,333 \times 0,836 \\
 &= 587,786 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \varepsilon'_s &= \frac{C_b - d}{C_b} \times \varepsilon_c \\
 &= \frac{703,333 - 61}{703,333} \times 0,003 \\
 &= 0,00273 \geq \varepsilon_y = 0,0015
 \end{aligned}$$

Tulangan desak sudah leleh

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_s &= \frac{H - C_b}{C_b} \times \varepsilon_c \\
 &= \frac{1055 - 703,333}{703,333} \times 0,003 \\
 &= 0,00152 \geq \varepsilon_y = 0,0015
 \end{aligned}$$

Tulangan tarik sudah leleh

$$\begin{aligned}
 f_s &= f_y \\
 &= 300 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_c &= 0,85 \times f'_c \times a_b \times B \\
 &= 0,85 \times 30 \times 587,786 \times 775 \\
 &= 11616115,2 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_s &= A'_s \times (f_y - 0,85 \times f'_c) \\
 &= 2660,928 \times (300 - (0,85 \times 30)) \\
 &= 730425,0043 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_s &= A_s \times f_s \\
 &= 2660,928 \times 300 \\
 &= 798278,6933 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Dengan memperhatikan keseimbangan gaya-gaya vertical, maka:

$$\begin{aligned}
 P_{nb} &= C_c + C_s - T_s \\
 &= 11616115,2 + 730425,0043 - 798278,693 \\
 &= 11548261,5 \text{ N} = 11548,261 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{nb} &= C_c \times \left(\frac{H_t}{2} - \frac{a_b}{2} \right) + C_s \times \left(\frac{H_t}{2} - d' \right) - T_s \times \left(\frac{H_t}{2} - d \right) \\
 &= 11616115,2 \times \left(\frac{1116}{2} - \frac{587,786}{2} \right) + 730425,0043 \times \left(\frac{1116}{2} - 61 \right) \\
 &\quad - 798278,693 \times \left(\frac{1116}{2} - 61 \right) \\
 &= 3827664729 \text{ Nmm} = 3827,665 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Perlu dihitung faktor reduksi (Φ) berdasarkan persamaan berikut

a) Jika $0,7 \times P_{nb} \geq (0,1 \times A_g \times f'_c)$ maka $\Phi = 0,7$

b) Jika $0,7 \times P_{nb} \geq (0,1 \times A_g \times f'_c)$ maka $\Phi = 0,9 - \left(\frac{0,2 \times (0,7 \times P_{nb})}{0,1 \times A_g \times f'_c} \right)$

$$\begin{aligned}
 0,1 \times A_g \times f'_c &= 0,1 \times 864900 \times 30 \\
 &= 2594700 \text{ N} = 2594,7 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 0,7 \times P_{nb} &= 0,7 \times 11548,261 \\
 &= 8083,783 \text{ kN} \geq (0,1 \times A_g \times f'_c) = 2594,7 \text{ kN} \rightarrow \Phi = 0,7
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{ub} &= \Phi P_{nb} = 0,7 \times 11548,26 \\
 &= 8083,783 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{ub} &= \Phi M_{nb} = 0,7 \times 3827,665 \\
 &= 2679,36531 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

2. Kondisi Patah Desak

$$\begin{aligned}
 C &= 1,1 \times C_b \\
 &= 1,1 \times 703,333 \\
 &= 773,667 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a &= C \times \beta \\
 &= 773,667 \times 0,836 \\
 &= 646,564 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \varepsilon'_s &= \frac{C - d}{C} \times \varepsilon_c \\
 &= \frac{773,667 - 61}{773,667} \times 0,003 \\
 &= 0,00276 \geq \varepsilon_y = 0,0015
 \end{aligned}$$

Tulangan desak sudah leleh

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_s &= \frac{H - C}{C} \times \varepsilon_c \\
 &= \frac{1055 - 773,667}{773,667} \times 0,003 \\
 &= 0,00109 < \varepsilon_y = 0,0015
 \end{aligned}$$

Tulangan tarik belum leleh

$$\begin{aligned}
 f_s &= \varepsilon_s \times E_s \\
 &= 0,00109 \times 200000 \\
 &= 218,182 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_c &= 0,85 \times f'_c \times a \times B \\
 &= 0,85 \times 30 \times 646,564 \times 775 \\
 &= 12777726,7 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_s &= A'_s \times (f_y - 0,85 \times f'_c) \\
 &= 2660,928 \times (300 - (0,85 \times 30)) \\
 &= 730425,0043 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_s &= A_s \times f_s \\
 &= 2660,928 \times 218,182 \\
 &= 580566,324 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_n &= C_c + C_s - T_s \\
 &= 12777726,7 + 730425,0043 - 580566,324 \\
 &= 12927585,38 \text{ N} = 12927,585 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_n &= C_c \times \left(\frac{H_t}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \times \left(\frac{H_t}{2} - d' \right) - T_s \times \left(\frac{H_t}{2} - d \right) \\
&= 12777726,7 \times \left(\frac{1116}{2} - \frac{587,786}{2} \right) + 730425,0043 \times \left(\frac{1116}{2} - 61 \right) \\
&\quad - 580566,324 \times \left(\frac{1116}{2} - 61 \right) \\
&= 3650723319 \text{ Nmm} = 3650,723 \text{ kNm}
\end{aligned}$$

Faktor reduksi

$$\begin{aligned}
0,7 \times P_n &= 0,7 \times 12927,585 \\
&= 9049,309 \text{ kN} \geq (0,1 \times A_g \times f'_c) = 2594,7 \text{ kN} \rightarrow \Phi = 0,7
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_u &= \Phi P_n = 0,7 \times 12927,585 \\
&= 9049,309 \text{ kN}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_u &= \Phi M_n = 0,7 \times 3650,723 \\
&= 2555,506 \text{ kNm}
\end{aligned}$$

3. Kondisi Patah Tarik

$$\begin{aligned}
C &= 0,9 \times C_b \\
&= 0,9 \times 703,333 \\
&= 633 \text{ mm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a &= C \times \beta \\
&= 633 \times 0,836 \\
&= 529,007 \text{ mm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon'_s &= \frac{C - d}{C} \times \varepsilon_c \\
&= \frac{633 - 61}{633} \times 0,003 \\
&= 0,00271 \geq \varepsilon_y = 0,0015
\end{aligned}$$

Tulangan desak sudah leleh

$$\begin{aligned}
\varepsilon_s &= \frac{H - C}{C} \times \varepsilon_c \\
&= \frac{1055 - 633}{633} \times 0,003 \\
&= 0,002 > \varepsilon_y = 0,0015
\end{aligned}$$

Tulangan tarik belum leleh

$$f_s = f_y$$

$$= 300 \text{ MPa}$$

$$C_c = 0,85 \times f'_c \times a \times B$$

$$= 0,85 \times 30 \times 529,007 \times 775$$

$$= 9292892,143 \text{ N}$$

$$C_s = A'_s \times (f_y - 0,85 \times f'_c)$$

$$= 2660,928 \times (300 - (0,85 \times 30))$$

$$= 730425,0043 \text{ N}$$

$$T_s = A_s \times f_s$$

$$= 2660,928 \times 300$$

$$= 798278,693 \text{ N}$$

$$P_n = C_c + C_s - T_s$$

$$= 9292892,143 + 730425,0043 - 798278,693$$

$$= 9225038,454 \text{ N} = 9225,038 \text{ kN}$$

$$M_n = C_c \times \left(\frac{H_t}{2} - \frac{a_b}{2} \right) + C_s \times \left(\frac{H_t}{2} - d' \right) - T_s \times \left(\frac{H_t}{2} - d \right)$$

$$= 9292892,14 \times \left(\frac{1116}{2} - \frac{587,786}{2} \right) + 730425,004$$

$$\times \left(\frac{1116}{2} - 61 \right) - 798278,693 \times \left(\frac{1116}{2} - 61 \right)$$

$$= 3760307855 \text{ Nmm} = 3760,307 \text{ kNm}$$

Faktor reduksi

$$0,7 \times P_n = 0,7 \times 9225,038$$

$$= 6457,527 \text{ kN} \geq (0,1 \times A_g \times f'_c) = 2594,7 \text{ kN} \rightarrow \Phi = 0,7$$

$$P_u = \Phi P_n = 0,7 \times 9225,038$$

$$= 6457,527 \text{ kN}$$

$$M_u = \Phi M_n = 0,7 \times 3760,307$$

$$= 2632,215 \text{ kNm}$$

4. Kondisi Beban Sentris

$$C_c = 0,85 \times f'_c \times H_t \times B$$

$$= 0,85 \times 30 \times 1116 \times 775$$

$$= 22054950 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} C_{s1} &= A_s \times (f_y - 0,85 \times f'_c) \\ &= 2660,928 \times (300 - (0,85 \times 30)) \\ &= 730425,0043 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{s2} &= A'_s \times (f_y - 0,85 \times f'_c) \\ &= 2660,928 \times (300 - (0,85 \times 30)) \\ &= 730425,0043 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_0 &= C_c + C_{s1} + C_{s2} \\ &= 22054950 + 730425,0043 + 730425,0043 \\ &= 23515800,01 \text{ N} = 23515,800 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{0\text{maks}} &= 0,8 \times P_0 \\ &= 0,8 \times 23515,800 \\ &= 18812,64 \text{ kN} \end{aligned}$$

5. Tarik Sentris

$$\begin{aligned} P_n &= -(A_s + A'_s) \times f_y \\ &= -(2660,928 + 2660,928) \times 300 \\ &= -1596557,387 \text{ N} = -1596,557 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$M_n = 0 \text{ kNm}$$

6. Lentur Murni

Kolom dianggap berperilaku sebagaimana lentur murni pada balok dengan tulangan desak belum leleh.

$$T_s = C_c + C_s$$

$$A_s \times f_y = (0,85 \times f'_c \times a \times B) + (A'_s \times f_s)$$

$$A_s \times f_y = (0,85 \times f'_c \times a \times B) + (A'_s \times (\epsilon_s \times E_s))$$

$$A_s \times f_y = (0,85 \times f'_c \times a \times B) + (A'_s \times \frac{a - \beta \times d'}{a} \times \epsilon_c \times E_s)$$

$$\begin{aligned} 2660,928 \times 300 &= (0,85 \times 30 \times a \times 775) + \\ &\quad (2660,928 \times \frac{a - (0,836 \times 61)}{a} \times 0,003 \times 200000) \end{aligned}$$

$$798278,693 = 19762,5a +$$

$$(2660,928 \times \frac{a - (0,836 \times 61)}{a} \times 0,003 \times 200000)$$

$$19762,5a^2 + 798278,693a - 81390214,7 = 0$$

$$a^2 - 40,394a - 4118,417 = 0$$

Dicari nilai a menggunakan persamaan berikut

$$\begin{aligned} a &= \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \\ &= \frac{40,394 + \sqrt{40,394^2 - 4 \times 1 \times -4118,417}}{2 \times 1} \\ &= 47,081 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c &= \frac{a}{\beta} \\ &= \frac{47,081}{0,836} \\ &= 56,336 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_s &= \frac{c - d'}{c} \times \varepsilon_c \\ &= \frac{56,336 - 61}{56,336} \times 0,003 \\ &= 0,000248 < \varepsilon_y = 0,0015 \end{aligned}$$

Tulangan desak belum leleh

$$\begin{aligned} f_s &= \varepsilon_s \times E_s \\ &= 0,000248 \times 200000 \\ &= 49,668 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Momen yang dapat dikerahkan

$$\begin{aligned} M_1 &= C_c \times \left(H - \frac{a}{2}\right) \\ M_1 &= (0,85 \times f'_c \times a \times B) \times \left(H - \frac{a}{2}\right) \\ &= (0,85 \times 30 \times 47,081 \times 775) \times \left(1055 - \frac{47,081}{2}\right) \\ &= 959713068,8 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_2 &= T_s \times (H - d') \\ M_2 &= (A'_s \times f_s) \times (H - d') \\ &= (2660,928 \times 49,668) \times (1055 - 61) \\ &= 131370244,7 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_n &= M_1 + M_2 \\ &= 959713068,8 + 131370244,7 \\ &= 1091083313 \text{ Nmm} = 1091,083 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Faktor reduksi

$$0,7 \times P_n = 0,7 \times 0$$

$$= 0 \text{ kN} \geq (0,1 \times A_g \times f'_c) = 2594,7 \text{ kN}$$

$$\Phi = 0,9 - \left(\frac{0,2 \times (0,7 \times P_{nb})}{0,1 \times A_g \times f'_c} \right)$$

$$= 0,9 - \left(\frac{0,2 \times (0,7 \times 0)}{2594,7} \right)$$

$$= 0,9$$

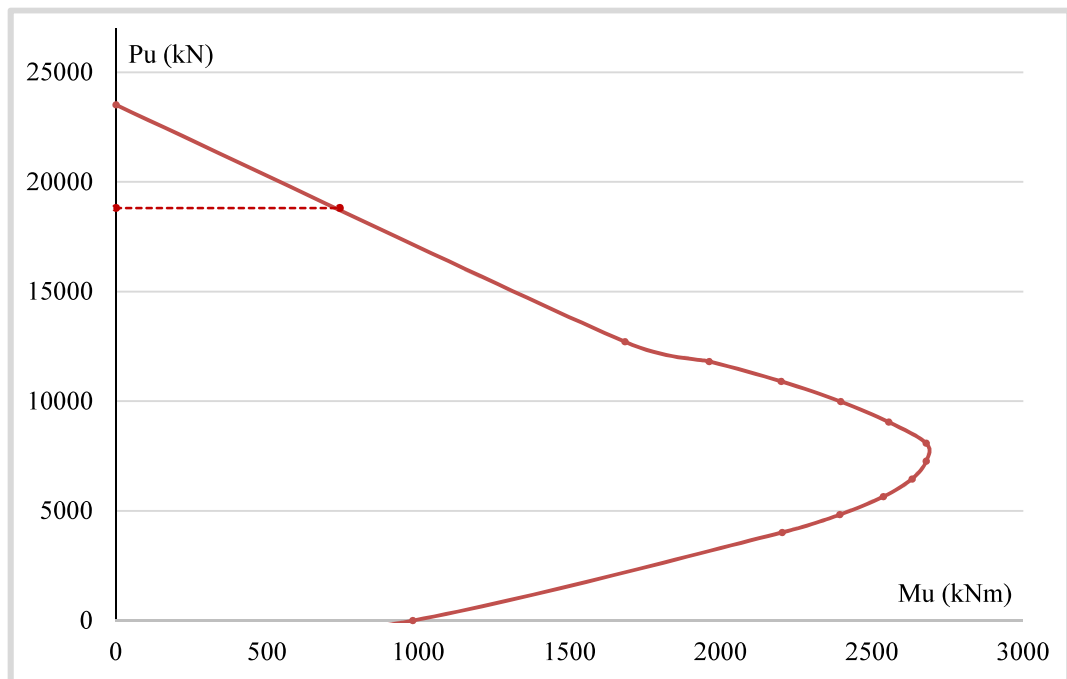
$$P_u = \Phi P_n = 0,9 \times 0$$

$$= 0 \text{ kN}$$

$$M_u = \Phi M_n = 0,9 \times 1091,083$$

$$= 981,975 \text{ kNm}$$

Selanjutnya kondisi kerusakan diatas digambar sehingga diperoleh diagram interaksi kolom persegi panjang yang ditinjau pada momen terhadap arah 2 yang dapat dilihat pada Gambar 5.41 berikut.

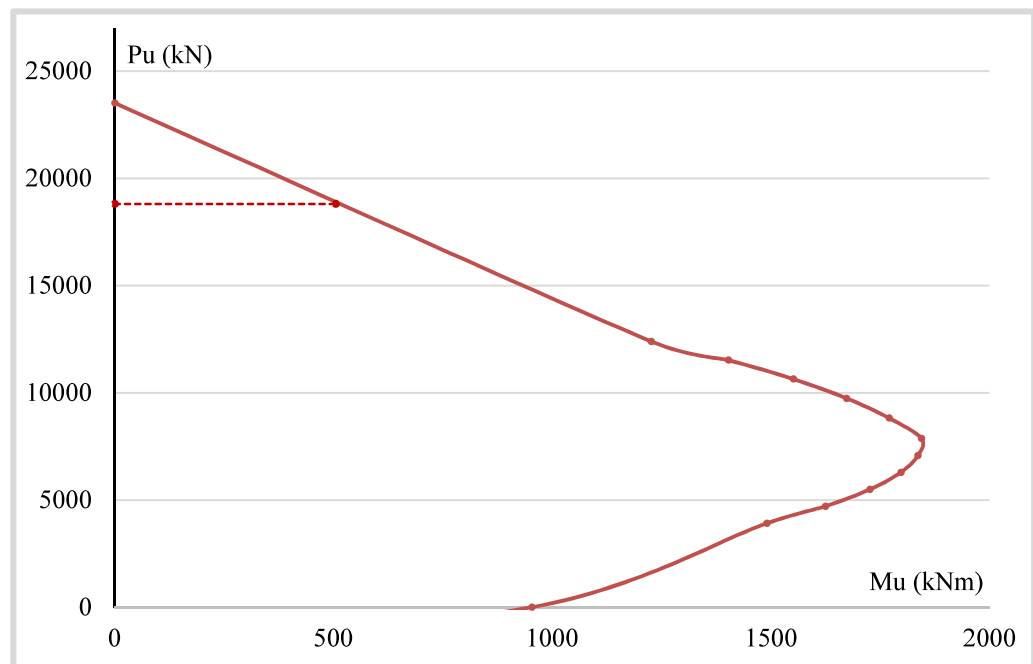


Gambar 5.41 Diagram Interaksi Kolom Persegi Panjang yang Ditinjau pada Momen Terhadap Arah 2

Untuk perhitungan diagram interaksi kolom persegi panjang yang ditinjau pada momen terhadap arah 3 dilakukan dengan cara yang sama dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 5.87 serta Gambar 5.42.

Tabel 5.87 Hasil Perhitungan Diagram Interaksi Kolom Persegi Panjang yang Ditinjau pada Momen Terhadap Arah 3

| Kondisi Kerusakan | Mn (kNm) | Pn (kN) | |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| Beban Sentris | 0,000 | 23515,800 | |
| Patah Desak | c = 1.5cb | 1226,631 | 12397,920 |
| | c = 1.4cb | 1402,712 | 11525,650 |
| | c = 1.3cb | 1551,279 | 10641,100 |
| | c = 1.2cb | 1673,336 | 9741,198 |
| | c = 1.1cb | 1770,248 | 8821,757 |
| Balance (c = cb) | 1843,930 | 7876,917 | |
| Patah Tarik | c = 0.9cb | 1836,330 | 7084,476 |
| | c = 0.8cb | 1797,207 | 6292,034 |
| | c = 0.7cb | 1726,561 | 5499,593 |
| | c = 0.6cb | 1624,392 | 4707,151 |
| | c = 0.5cb | 1490,699 | 3914,710 |
| Lentur Murni | 953,713 | 0,000 | |
| Tarik Sentris | 0,000 | -1596,557 | |



Gambar 5.42 Diagram Interaksi Kolom Persegi Panjang yang Ditinjau pada Momen Terhadap Arah 3

Diagram interaksi kolom persegi panjang untuk semua lantai serta untuk model 1, model 2, dan model 3 disamakan karena menggunakan bentuk kolom yang sama.

Untuk perhitungan diagram interaksi kolom bujur sangkar yang ditinjau pada momen terhadap arah 3 dan arah 2 yang digunakan di semua lantai pada model 4, dilakukan dengan cara yang sama.

$$\begin{aligned} A_g &= B \times Ht \\ &= 930 \times 930 \\ &= 864900 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Luas tulangan memanjang (A_{st}) tidak boleh kurang dari $0,01A_g$ dan tidak lebih dari $0,06A_g$, maka dicoba menggunakan jumlah tulangan sebanyak 24 buah.

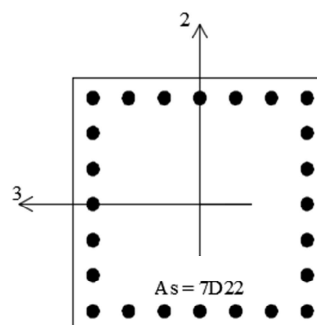
$$\begin{aligned} A_{st} &= n \times A_{dp} \\ &= 24 \times 380,133 \\ &= 9123,19 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$(0,01 \times A_g) \leq A_{st} \leq (0,06 \times A_g)$$

$$(0,01 \times 864900) \leq 9123,19 \leq (0,06 \times 864900)$$

$$8649,00 \leq 9123,19 \leq 51894,00$$

Jumlah tulangan memenuhi persyaratan. sehingga untuk selanjutnya akan dianalisis penampang kolom dalam berbagai kondisi kerusakan dengan jumlah tulangan tiap sisi sebanyak 7 buah.

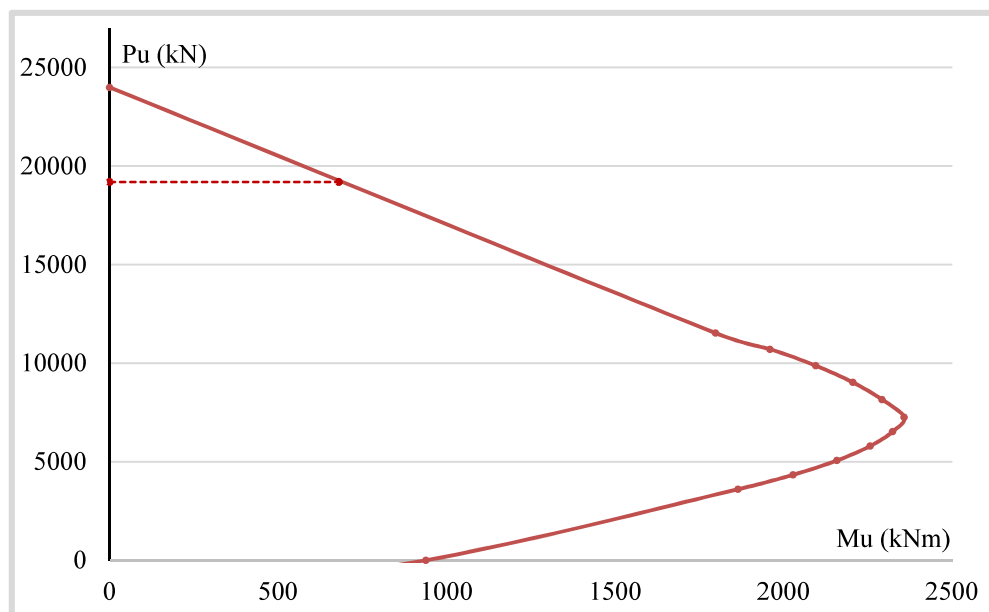


Gambar 5.43 Konfigurasi Tulangan Penampang Kolom Bujur Sangkar

Hasil analisis penampang kolom dalam berbagai kondisi kerusakan dan diagram interaksi kolom bujur sangkar yang ditinjau pada momen terhadap arah 3 dan arah 2 dapat dilihat pada Tabel 5.88 dan Tabel 5.89 serta Gambar 5.44 dan Gambar 5.45.

Tabel 5.88 Hasil Perhitungan Diagram Interaksi Kolom Bujur Sangkar yang Ditinjau pada Momen Terhadap Arah 2

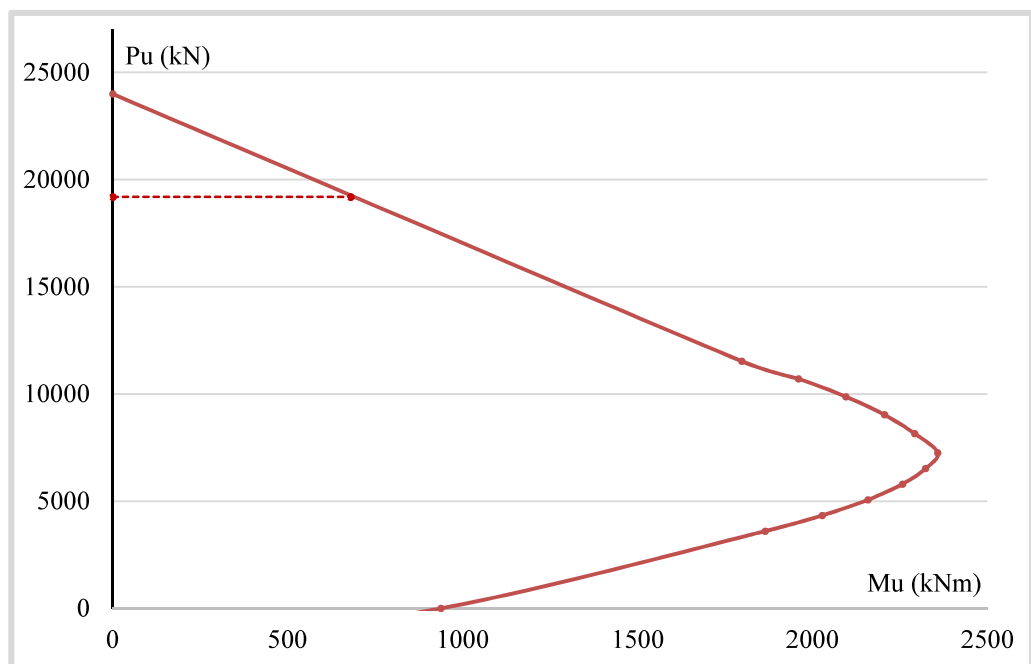
| Kondisi Kerusakan | Mn (kNm) | Pn (kN) | |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| Beban Sentris | 0,000 | 23994,767 | |
| Patah Desak | c = 1.5cb | 1797,851 | 11527,064 |
| | c = 1.4cb | 1959,882 | 10708,594 |
| | c = 1.3cb | 2095,211 | 9876,615 |
| | c = 1.2cb | 2205,203 | 9027,750 |
| | c = 1.1cb | 2291,719 | 8157,392 |
| Balance (c = cb) | 2357,362 | 7259,094 | |
| Patah Tarik | c = 0.9cb | 2323,121 | 6528,435 |
| | c = 0.8cb | 2256,719 | 5797,776 |
| | c = 0.7cb | 2158,159 | 5067,116 |
| | c = 0.6cb | 2027,438 | 4336,457 |
| | c = 0.5cb | 1864,559 | 3605,798 |
| Lentur Murni | 937,943 | 0,000 | |
| Tarik Sentris | 0,000 | -2075,525 | |



Gambar 5.44 Diagram Interaksi Kolom Bujur Sangkar yang Ditinjau pada Momen Terhadap Arah 2

Tabel 5.89 Hasil Perhitungan Diagram Interaksi Kolom Bujur Sangkar yang Ditinjau pada Momen Terhadap Arah 3

| Kondisi Kerusakan | Mn (kNm) | Pn (kN) | |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| Beban Sentris | 0,000 | 23994,767 | |
| Patah Desak | c = 1.5cb | 1797,851 | 11527,064 |
| | c = 1.4cb | 1959,882 | 10708,594 |
| | c = 1.3cb | 2095,211 | 9876,615 |
| | c = 1.2cb | 2205,203 | 9027,750 |
| | c = 1.1cb | 2291,719 | 8157,392 |
| Balance (c = cb) | 2357,362 | 7259,094 | |
| Patah Tarik | c = 0.9cb | 2323,121 | 6528,435 |
| | c = 0.8cb | 2256,719 | 5797,776 |
| | c = 0.7cb | 2158,159 | 5067,116 |
| | c = 0.6cb | 2027,438 | 4336,457 |
| | c = 0.5cb | 1864,559 | 3605,798 |
| Lentur Murni | 937,943 | 0,000 | |
| Tarik Sentris | 0,000 | -2075,525 | |



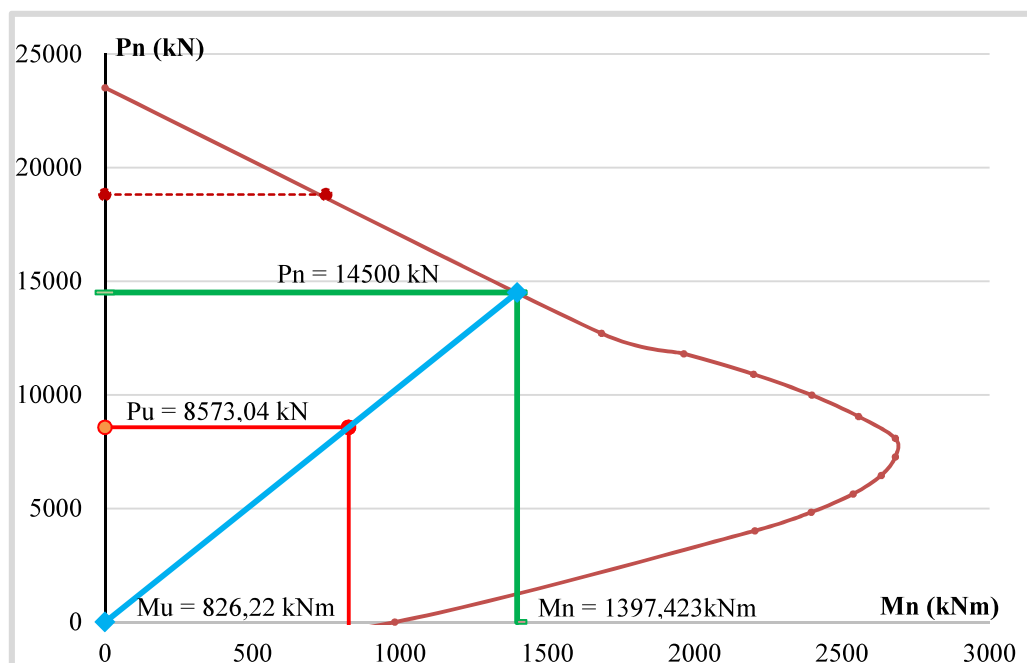
Gambar 5.45 Diagram Interaksi Kolom Bujur Sangkar yang Ditinjau pada Momen Terhadap Arah 3

5.5.4 Kontrol Kuat Lentur Kolom

Kekuatan kolom harus lebih besar dari kekuatan balok, sehingga kuat lentur pada kolom harus mampu memiliki kekuatan untuk menahan momen yang terjadi pada balok. Perlu dilakukan kontrol terhadap gaya aksial yang menghasilkan kuat lentur nominal terkecil (M_{nc}) dari analisis ETABS 2013 dibandingkan dengan kuat lentur nominal balok (M_{nb}) sesuai persyaratan Pasal 21.6.2.2, SNI 2837:2013. Berikut merupakan perhitungan kontrol kuat lentur pada kolom persegi panjang dan kolom bujur sangkar.

1. Kolom Persegi Panjang

Diperoleh nilai P_u dan M_u kolom persegi panjang pada model 1, model 2, dan model 3 dari ETABS 2013 untuk selanjutnya diplot ke diagram interaksi untuk memperoleh nilai lentur nominal (M_{nc}). Dibawah ini dicontohkan plot nilai P_u dan M_u model 1 yang menggunakan kolom persegi panjang dari hasil analisis diperoleh nilai $P_u = 8573,04$ kN dan $M_u = 826,22$ kNm pada diagram interaksi ditunjukkan pada Gambar 5.46.



Gambar 5.46 Plot nilai P_u dan M_u Kolom Persegi Panjang

Digunakan cara yang sama untuk model lainnya yang menggunakan kolom persegi panjang sehingga hasil plot nilai Pu dan Mu pada model lainnya dapat dilihat pada Tabel 5.90 berikut.

Tabel 5.90 Hasil Plot Nilai Pu dan Mu Kolom Persegi Panjang

| Model | Lantai | Pu (kN) dari ETABS | Mu (kNm) dari ETABS | Mn (kNm) dari Diagram |
|---------|--------|-----------------------|------------------------|--------------------------|
| Model 1 | 1,2,3 | 8573,04 | 826,22 | 1397,423 |
| | 4,5,6 | 5594,13 | 412,38 | 1157,345 |
| | 7,8,9 | 2614,27 | 397,36 | 1808,743 |
| Model 2 | 1,2,3 | 8582,94 | 763,12 | 1395,904 |
| | 4,5,6 | 5597,76 | 372,85 | 1165,612 |
| | 7,8,9 | 2615,93 | 358,10 | 1848,062 |
| Model 3 | 1,2,3 | 8578,82 | 548,34 | 1108,971 |
| | 4,5,6 | 5597,97 | 323,20 | 1047,889 |
| | 7,8,9 | 2616,01 | 316,29 | 1716,875 |

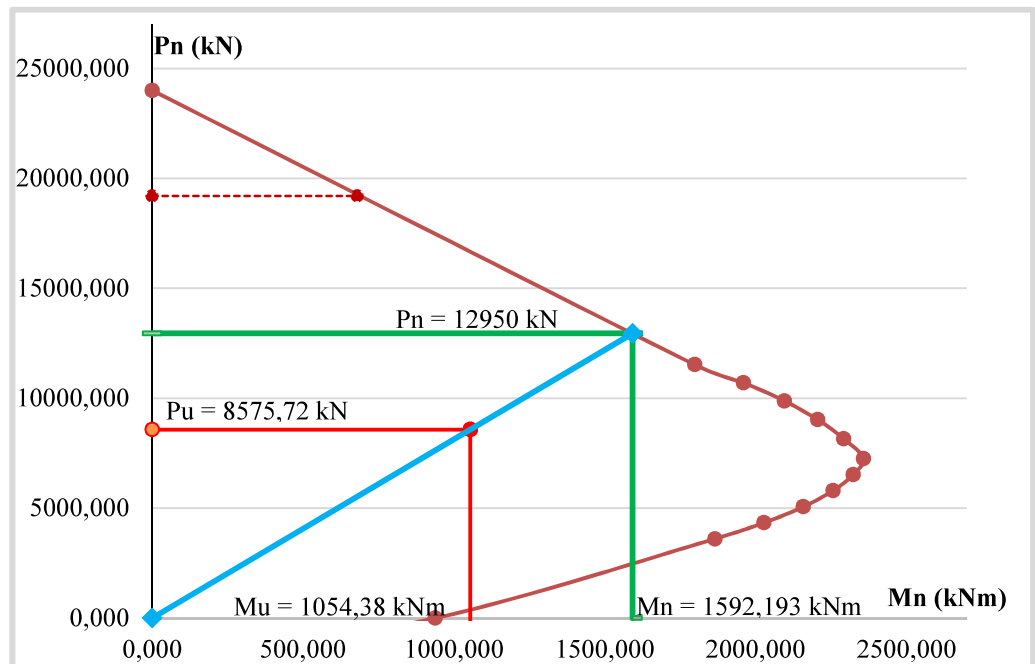
$$\begin{aligned}\Sigma M_{nc} &= M_{nc \text{ atas}} + M_{nc \text{ bawah}} \\ &= 1157,345 + 1397,423 \\ &= 2554,768 \text{ kNm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}1,2\Sigma M_{nc} &= 1,2 \times (569,16 + 507,68) \\ &= 1292,208 \text{ kNm} < \Sigma M_{nc} = 2554,768 \text{ kNm}\end{aligned}$$

Maka persyaratan kekuatan kolom lebih besar dari kekuatan balok sesuai Pasal 21.6.2.2, SNI 2837:2013 terpenuhi.

2. Kolom Bujur Sangkar

Diperoleh nilai Pu dan Mu kolom bujur sangkar pada model 4 dari ETABS 2013 untuk selanjutnya diplot ke diagram interaksi untuk memperoleh nilai lentur nominal (M_{nc}). Dibawah ini dicontohkan plot nilai Pu dan Mu model 4 yang menggunakan kolom bujur sangkar dari hasil analisis diperoleh nilai Pu = 8575,72 kN dan Mu = 1054,38 kNm pada diagram interaksi ditunjukkan pada Gambar 5.47 berikut.



Gambar 5.47 Plot nilai Pu dan Mu Kolom Bujur Sangkar

Digunakan cara yang sama untuk model lainnya yang menggunakan kolom persegi panjang sehingga hasil plot nilai Pu dan Mu pada model lainnya dapat dilihat pada Tabel 5.91 berikut.

Tabel 5.91 Hasil Plot Nilai Pu dan Mu Kolom Bujur Sangkar

| Model | Lantai | Pu (kN) dari ETABS | Mu (kNm) dari ETABS | Mn (kNm) dari Diagram |
|---------|--------|-----------------------|------------------------|--------------------------|
| Model 4 | 1,2,3 | 8575,72 | 1054,38 | 1592,193 |
| | 4,5,6 | 5595,93 | 459,26 | 1259,786 |
| | 7,8,9 | 2615,08 | 441,08 | 1872,212 |

$$\begin{aligned}\Sigma M_{nc} &= M_{nc \text{ atas}} + M_{nc \text{ bawah}} \\ &= 1259,786 + 1592,193 \\ &= 2851,979 \text{ kNm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}1,2\Sigma M_{nc} &= 1,2 \times (449,87 + 401,67) \\ &= 1021,848 \text{ kNm} < \Sigma M_{nc} = 2851,979 \text{ kNm}\end{aligned}$$

Maka persyaratan kekuatan kolom lebih besar dari kekuatan balok sesuai Pasal 21.6.2.2, SNI 2837:2013 terpenuhi.

5.6 Pushover Analysis

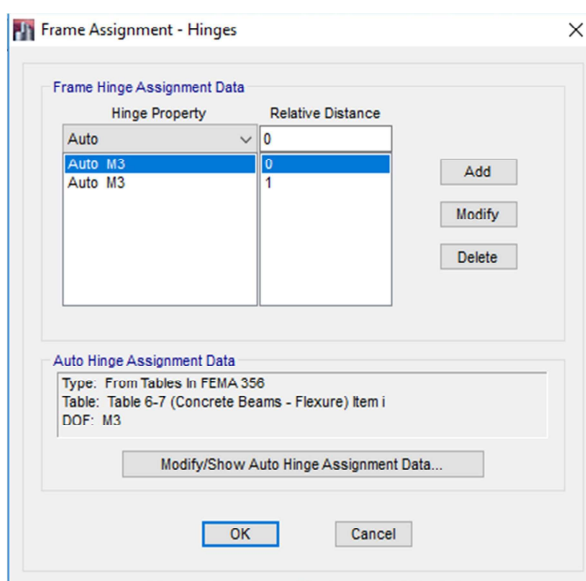
5.6.1 Sendi Plastis

Input pemodelan sendi plastis mengacu pada ketentuan FEMA 356 yang dilakukan secara *automatic* pada ETABS 2013.

5.6.1.1 Pada Balok

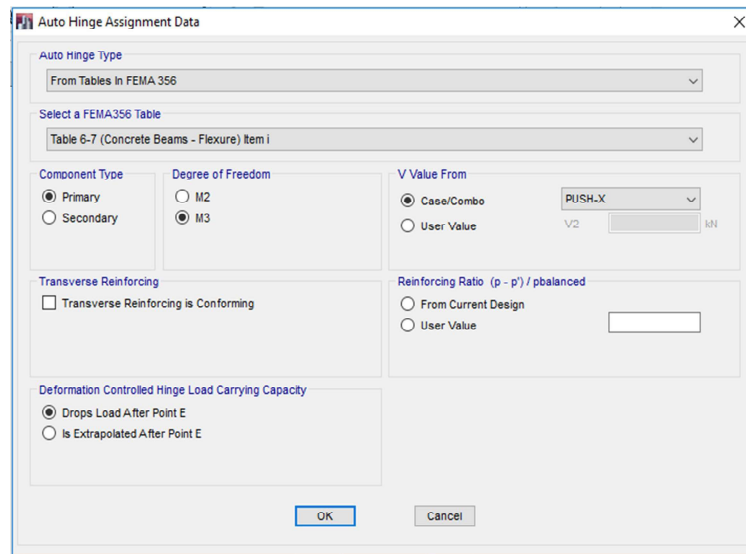
Input pemodelan sendi plastis pada balok dapat melalui tahapan berikut.

1. Memilih semua elemen balok pada seluruh lantai pada struktur.
2. Melakukan input sendi plastis lewat menu *Assign – Frame – Hinges*, kemudian mengisi nilai *Relative Distance* pada kotak dialog *Frame Hinge Assignment Data* dengan nilai 0 yang menunjukkan lokasi sendi plastis pada pangkal balok dan nilai 1 yang menunjukkan lokasi sendi plastis pada ujung balok. Ditunjukkan pada Gambar 5.48.



Gambar 5.48 Input Sendi Plastis pada Balok

3. Memilih properti sendi plastis lewat *Modify/Show Auto Hinges Assignment Data*, pada *Auto Hinges Type* dipilih *From Tables in FEMA 356* dan *Select a FEMA 356 Table* dipilih *Table 6-7 (Concrete Beams – Flexure) Item i* yang berarti properti sendi plastis dilakukan secara *automatic* berdasarkan ketentuan FEMA 356 dan pada *Degree of Freedom* dipilih *M3* yang berarti sendi plastis terjadi karena momen searah sumbu local 3 balok. Ditunjukkan pada Gambar 5.49.

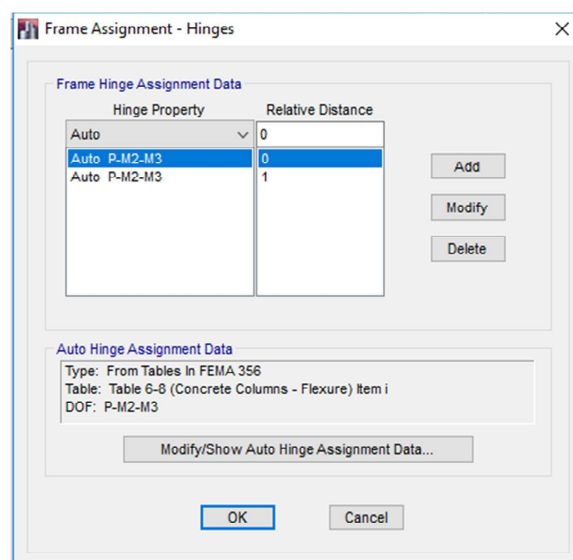


Gambar 5.49 Properti Sendi Plastis pada Balok.

5.6.1.2 Pada Kolom

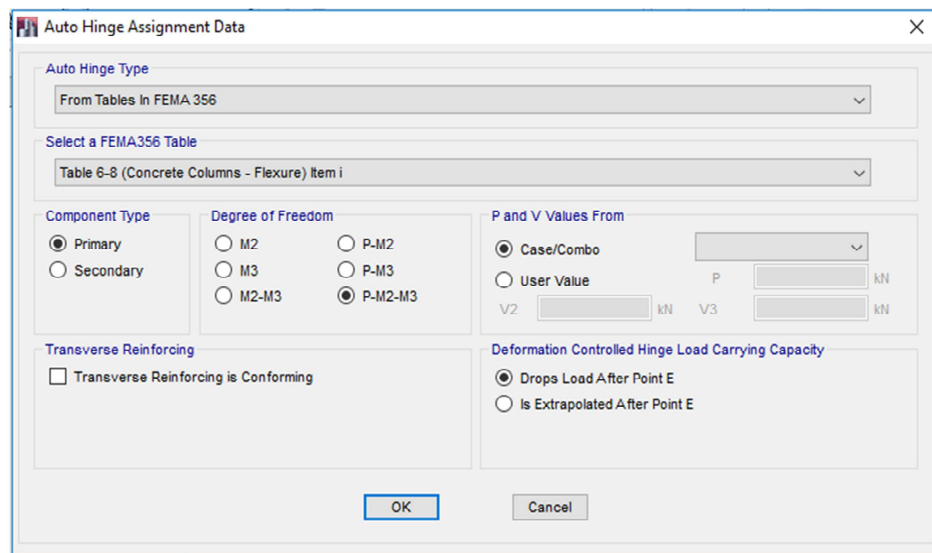
Input pemodelan sendi plastis pada kolom dapat melalui tahapan berikut.

1. Memilih semua elemen kolom pada seluruh lantai pada struktur.
2. Melakukan input sendi plastis lewat menu *Assign – Frame – Hinges*, kemudian mengisi nilai *Relative Distance* pada kotak dialog *Frame Hinge Assignment Data* dengan nilai 0 yang menunjukkan lokasi sendi plastis pada pangkal kolom dan nilai 1 yang menunjukkan lokasi sendi plastis pada ujung kolom. Ditunjukkan pada Gambar 5.50.



Gambar 5.50 Input Sendi Plastis pada Kolom

3. Memilih properti sendi plastis lewat *Modify/Show Auto Hinges Assignment Data*, pada *Auto Hinges Type* dipilih *From Tables in FEMA 356* dan *Select a FEMA 356 Table* dipilih *Table 6-8 (Concrete Columns – Flexure) Item i* yang berarti property sendi plastis dilakukan secara *automatic* berdasarkan ketentuan FEMA 356 dan pada *Degree of Freedom* dipilih *P-M2-M3* yang berarti sendi plastis terjadi karena interaksi gaya aksial (P) dengan momen sumbu local 2 (M2) dan sumbu local (M3) pada kolom. Ditunjukkan pada Gambar 5.51.



Gambar 5.51 Properti Sendi Plastis pada Kolom.

5.6.2 Gaya Lateral *Pushover Analysis*

Prinsip *Pushover Analysis* adalah menggantikan gaya-gaya horizontal yang bekerja pada struktur akibat pergerakan geser tanah dengan pola beban staik tertentu dalam arah lateral yang diterima pada masing-masing lantai. Gaya yang dimaksud adalah gaya gempa ekuivalen static yang sudah dihitung pada subbab 5.2.3.2 yang selanjutnya digunakan untuk pembebanan *pushover analysis*.

5.6.3 Pembebanan *Pushover Analysis*

Pembebanan dalam *Pushover Analysis* melewati dua tahap, pembebanan gravitasi sebagai tahap awal berupa beban mati dan beban hidup dimana belum mempertimbangkan kondisi nonlinier dilanjutkan tahap pembebanan lateral berupa gaya gempa ekuivalen static tiap lantai.

5.6.3.1 Pembebanan Gravitasi

Pembebanan gravitasi dilakukan melalui menu *Define – Load Case – Add New Case*, ditampilkan dalam Gambar 5.52.

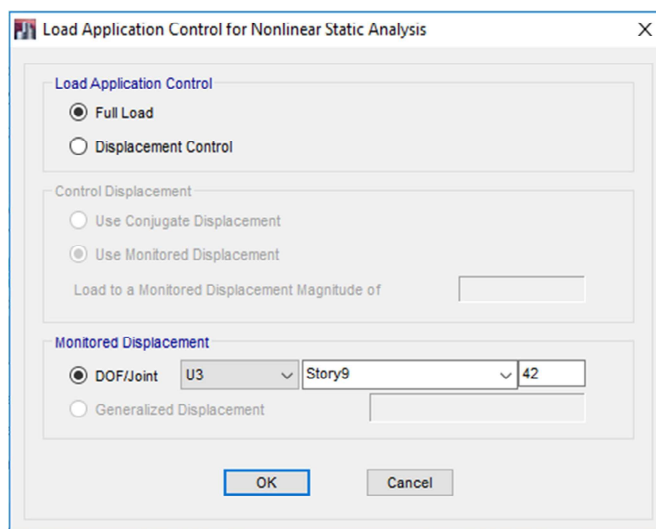
| Load Type | Load Name | Scale Factor |
|--------------|-----------|--------------|
| Load Pattern | Dead | 1 |
| Load Pattern | Live | 0,3 |

Gambar 5.52 Properti *Load Case* Beban Gravitasi

Properti load case beban gravitasi dimodifikasi sebagai berikut.

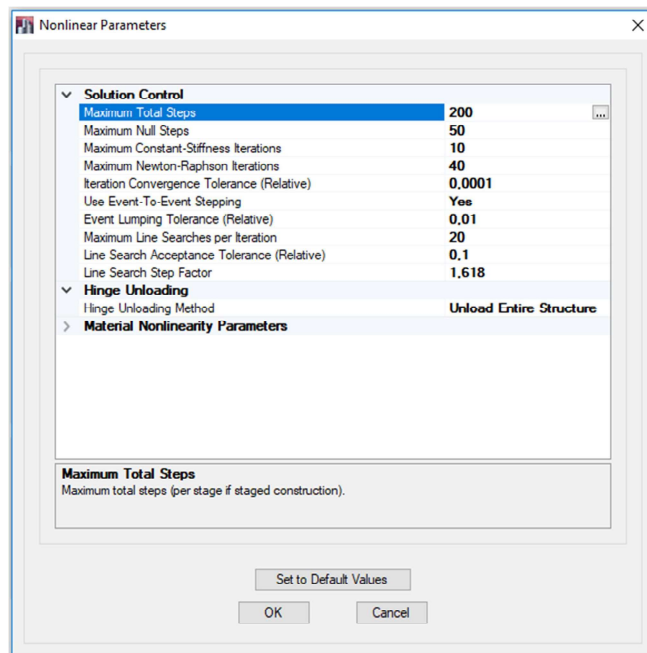
- Load Case Type* dipilih *Nonlinier Static*.
- Initial conditions* dipilih *Zero Initial Conditions – Start from Unstressed Store*, yang berarti pembebanan dilakukan sebagai kondisi awal sebelum struktur menerima beban lateral.

- c. *Load Applied* dimasukkan beban mati (*Dead*) dengan *Scale factor* 1 dan beban hidup (*Live*) dengan *Scale Factor* 0,3. Dalam hal ini prosentase beban gravitasi yang digunakan dalam analisis adalah 100% beban mati dan 30% beban hidup.
- d. Kemudian perlu dimodifikasi pada pilihan *Other Parameters - Load Application* yaitu *Load Application Control* dipilih *Full Load* dan pada *Monitored Displacement* DOF = U3 seperti ditampilkan dalam Gambar 5.53.



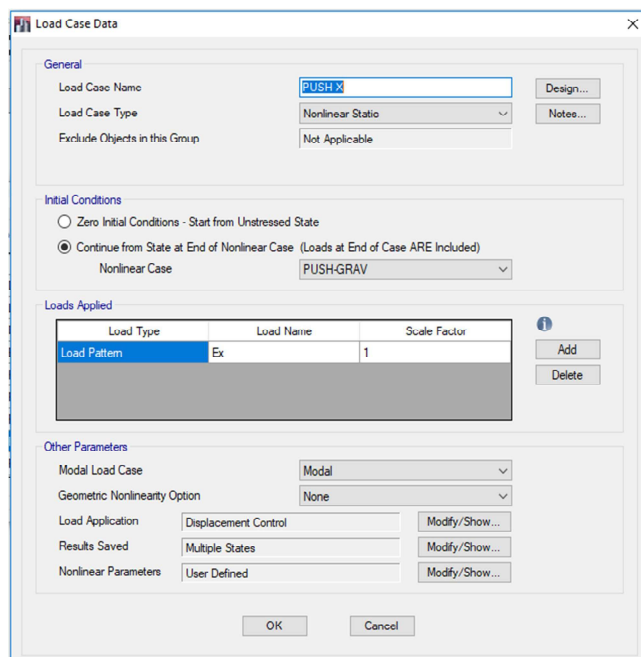
Gambar 5.53 *Load Application* Pembebanan Gravitasi

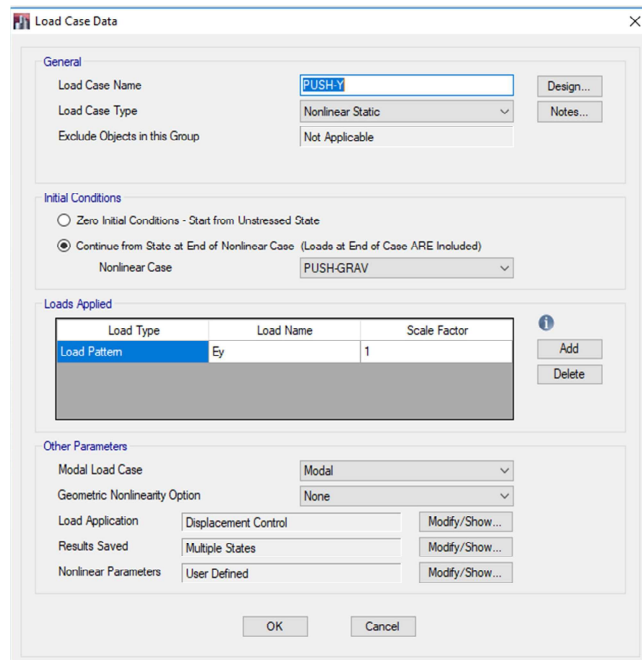
- e. Pada pilihan *Other Parameters - Results Saved* dibiarkan default.
- f. Pada pilihan *Other Parameters - Nonlinear Parameters* dimodifikasi seperti ditampilkan pada Gambar 5.54.

Gambar 5.54 *Nonlinear Parameters*

5.6.3.2 Pembebanan Lateral

Pembebanan lateral dilakukan ke dua arah yaitu arah x dan arah y, maka perlu dibuat 2 *load case* melalui menu *Define – Load Case – Add New Case*, ditampilkan dalam Gambar 5.55 dan Gambar 5.56.

Gambar 5.55 Properti *Load Case* Beban Lateral Arah X

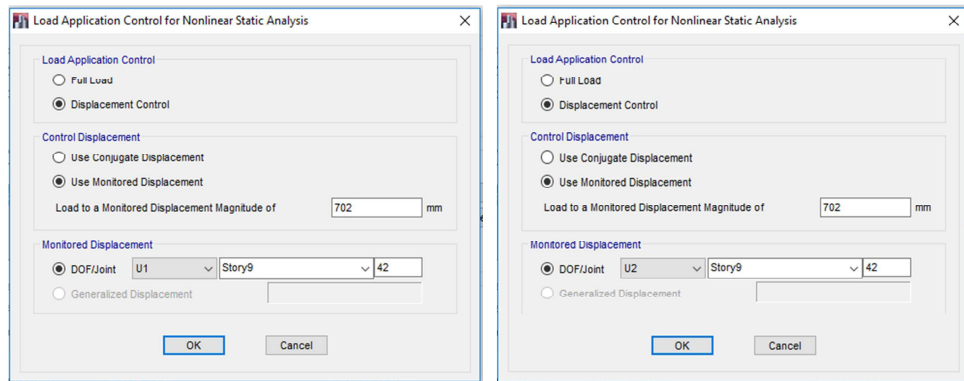


Gambar 5.56 Properti *Load Case* Beban Lateral Arah Y

Properti load case beban gravitasi dimodifikasi sebagai berikut.

- a. *Load Case Type* dipilih *Nonlinier Static*.
- b. *Initial conditions* dipilih *Continue from State at End of Nonlinier Case = PUSH-GRAV*, yang berarti pembebanan lateral dilakukan setelah pembebanan gravitasi selesai dilakukan.
- c. *Load Applied* dimasukkan beban gempa static ekuivalen arah x (E_x) untuk arah x dan beban gempa static ekuivalen arah y (E_y) untuk arah y dengan *Scale Factor* 1.
- d. Kemudian perlu dimodifikasi pada pilihan *Other Parameters - Load Application* yaitu *Load Application Control* dipilih *Displacement Control*, *Control Displacement* dipilih *Use Monitored Displacement* dengan mengisi nilai *Load to a Monitored Displacement Magnitude of* = 702 mm yang berarti pada saat *pushover analysis* simpangan akan ditinjau hingga besarnya mencapai 2% dari tinggi bangunan (3510 mm).

- e. Pada *Monitored Displacement DOF/Joint* = U1 untuk arah x dan U2 untuk arah y dengan dengan *story* = 9 dan *joint* = 42 yang berarti simpangan akan dimonitor di titik 42 pada lantai 9 seperti ditampilkan dalam Gambar 5.57 berikut.

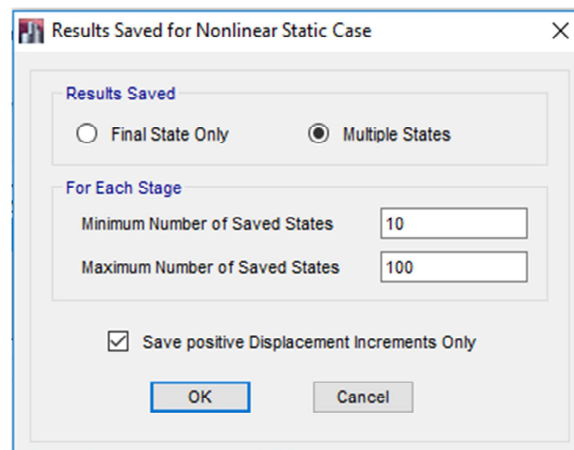


(a) arah x

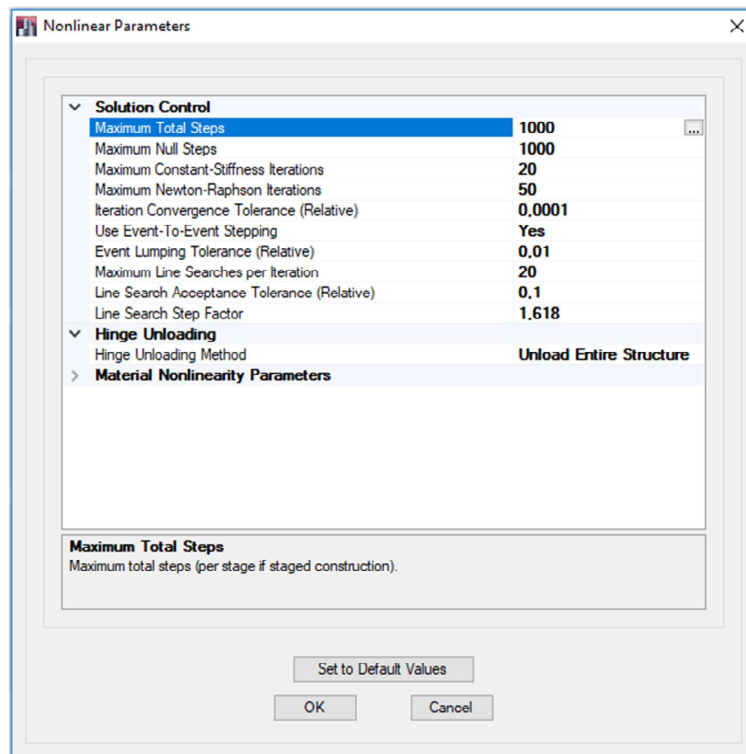
(b) arah y

Gambar 5.57 *Load Application Control* Pembebanan Lateral

- f. Pada pilihan *Other Parameters – Results Saved* dipilih *Multiple States* dengan *Minimum Number of Saved States* = 10 dan *Maximum Number of Saved States* = 100 seperti pada Gambar 5.58.

Gambar 5.58 *Results Saved* Pembebanan Lateral Arah X dan Arah Y

- g. Pada pilihan *Other Parameters – Nonlinear Parameters* dimodifikasi nilai pada *Solution Control* seperti ditampilkan pada Gambar 5.59.



Gambar 5.59 *Nonlinier Parameters* Arah X dan Arah Y

5.7 Hasil *Pushover Analysis*

Hasil *pushover analysis* yaitu berupa kurva kapasitas kemudian akan diperoleh hasil lain berupa nilai daktilitas simpangan.

5.7.1 Kurva Kapasitas

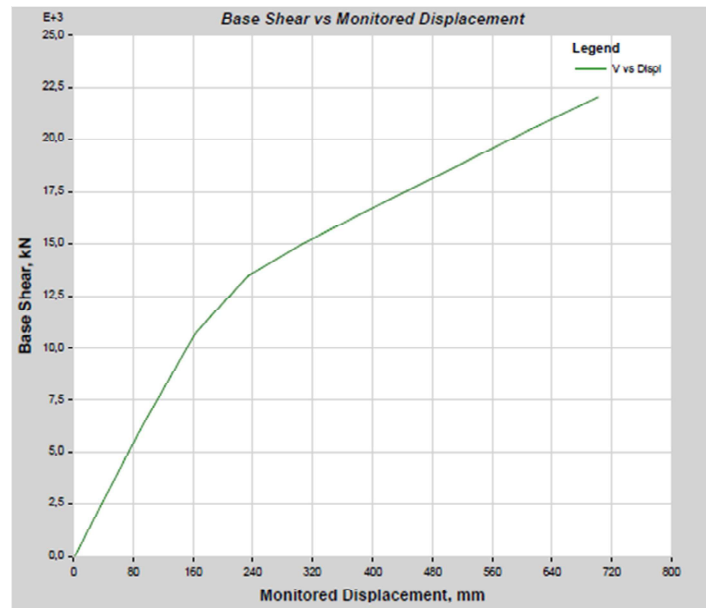
Kurva kapasitas menggambarkan hubungan gaya geser dasar (V) dan simpangan titik acuan pada atap struktur (Δ) seiring dengan kenaikan beban dorong mulai menunjukkan perilaku yang non-linier sampai target *displacement* yang telah ditentukan. Kurva kapasitas dapat dilihat pada ETABS 2013 lewat menu *Display – Static Pushover Curve*.

1. Model 1

Pada arah x, pembebanan lateral mulai diterapkan pada Step-1 sebesar 4815,46 kN menghasilkan simpangan sebesar 71 mm. hal ini menunjukkan perubahan kondisi leleh pertama atau perubahan dari kondisi elastic menjadi inelastic. Analisis berhenti pada Step-10 dimana tercapai target simpangan pada 702,8 mm dengan beban lateral sebesar 22035,364 kN. besarnya gaya geser dasar dan simpangan titik acuan pada atap struktur pada Tabel 5.92 serta kurva kapasitas dapat dilihat pada Gambar 5.60.

Tabel 5.92 Gaya Geser Dasar dan Simpangan Arah X Model 1

| Step | <i>Monitored Displ</i> (mm) | <i>Base Force</i> (kN) |
|------|--------------------------------|---------------------------|
| 0 | 0,8 | 0 |
| 1 | 71 | 4815,46 |
| 2 | 93,1 | 6333,43 |
| 3 | 163,7 | 10747,80 |
| 4 | 234,4 | 13451,22 |
| 5 | 307,5 | 14995,65 |
| 6 | 414,7 | 16946,09 |
| 7 | 492,9 | 18385,40 |
| 8 | 568 | 19737,86 |
| 9 | 642,4 | 21028,59 |
| 10 | 702,8 | 22035,36 |

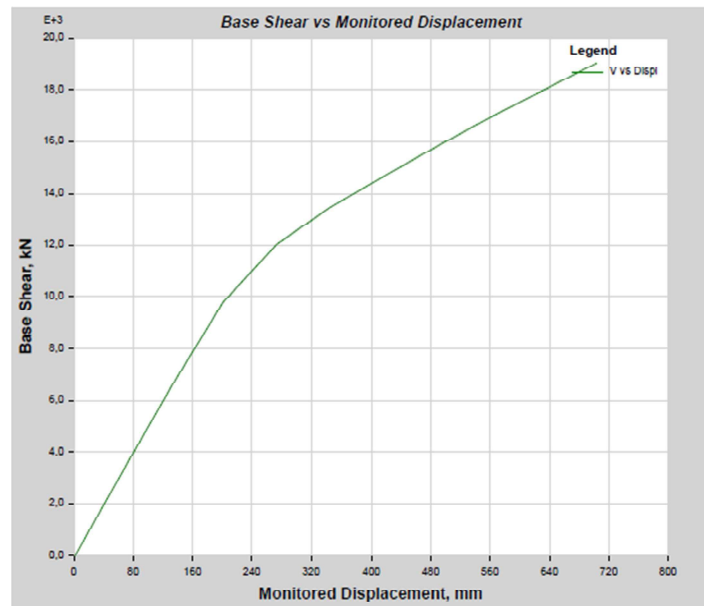


Gambar 5.60 Kurva Kapasitas Arah X Model 1

Pada arah y, pembebanan lateral mulai diterapkan pada Step-1 sebesar 3556,50 kN menghasilkan simpangan sebesar 71,7 mm. Analisis berhenti pada Step-10 dimana tercapai target simpangan pada 703,5 mm dengan beban lateral sebesar 19013,11 kN. Besarnya gaya geser dasar dan simpangan pada titik acuan dapat dilihat pada Tabel 5.93 serta kurva kapasitas pada Gambar 5.61.

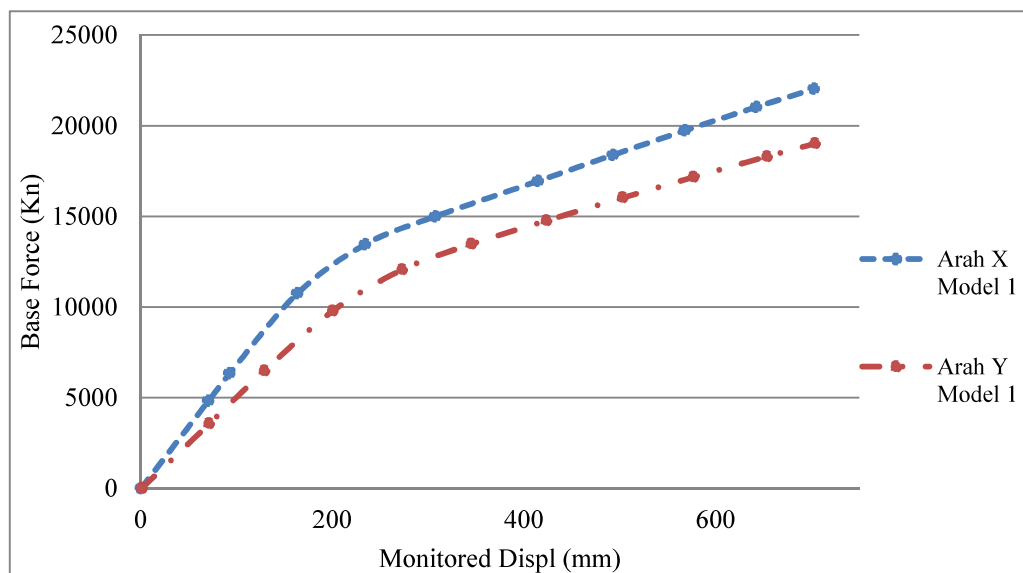
Tabel 5.93 Gaya Geser Dasar dan Simpangan Arah Y Model 1

| Step | <i>Monitored Displ</i> (mm) | <i>Base Force</i> (kN) |
|------|-----------------------------|------------------------|
| 0 | 1,5 | 0 |
| 1 | 71,7 | 3556,50 |
| 2 | 129,4 | 6479,26 |
| 3 | 200,5 | 9780,68 |
| 4 | 272,9 | 12051,42 |
| 5 | 345,1 | 13466,97 |
| 6 | 423,6 | 14762,04 |
| 7 | 503,1 | 16027,49 |
| 8 | 576,9 | 17163,54 |
| 9 | 653,5 | 18296,15 |
| 10 | 703,5 | 19013,11 |



Gambar 5.61 Kurva Kapasitas Arah Y Model 1

Perbandingan kurva kapasitas arah x dan arah y pada model 1 dapat dilihat pada Gambar 5.62 berikut.










Gambar 5.62 Perbandingan Kurva Kapasitas Arah X dan Arah Y Model 1

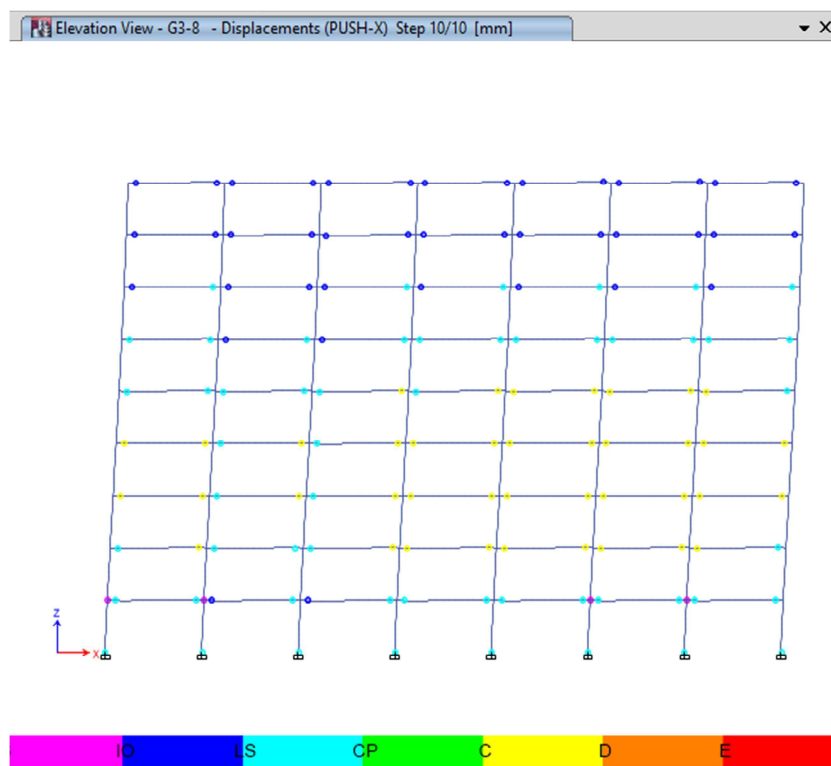
Berdasarkan Gambar 5.62 terlihat bahwa analisis *Pushover* pada kedua arah berhenti pada target *Monitored Displacement* yang telah ditentukan, yaitu sebesar 2% dari tinggi bangunan ($0,02 \times 3510 = 702$ mm).

Pada Gambar 5.62 juga dapat dilihat bahwa gaya geser dasar arah x yang terjadi lebih besar daripada arah y, berarti pada model 1 arah x sumbu global bangunan lebih kuat dalam menahan gaya dasar daripada arah y sumbu global bangunan. Hal tersebut berkaitan dengan plastifikasi yang terjadi akibat analisis *pushover*, perilaku plastifikasi elemen struktur ditunjukkan dengan perubahan warna pada daerah sendi plastis, penjelasan mengenai warna sendi plastis dapat dilihat pada Tabel 5.94 berikut.

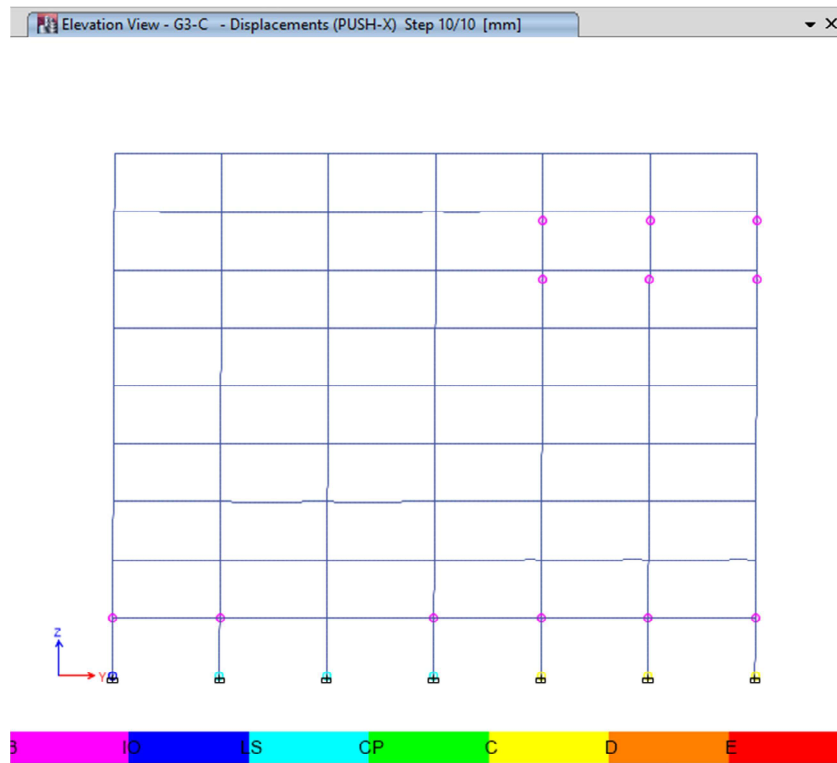
Tabel 5.94 Warna Sendi Plastis

| Keterangan | Simbol | Penjelasan |
|------------|---|--|
| B |  | Menunjukkan batas linier yang kemudian diikuti terjadi pelelehan pertama pada struktur |
| IO |  | Kerusakan kecil pada struktur (tidak berarti), kekakuan struktur hampir sama saat sebelum terjadi gempa |
| LS |  | Kerusakan mulai dari kecil hingga sedang. Kekakuan struktur berkurang tapi masih mempunyai ambang yang cukup besar terhadap keruntuhan |
| CP |  | Kerusakan parah pada struktur, kekuatan dan kekakuan berkurang banyak |
| C |  | Batas maksimum gaya geser masih mampu ditahan gedung |
| D |  | Degradasi kekuatan struktur besar, kondisi struktur tidak stabil hampir runtuh |
| E |  | Struktur sudah tidak mampu menahan gaya geser dan runtuh. |

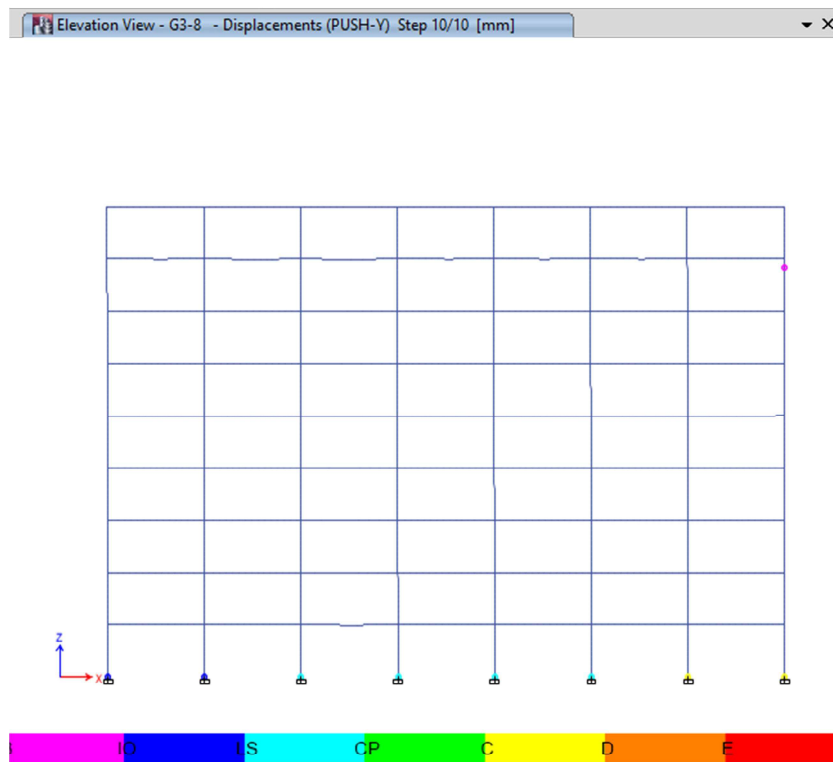
Akibat *pushover* arah x dan *pushover* arah y pada lantai yang sama dan step terakhir *pushover*, plastifikasi tingkat batas maksimum gaya geser yang masih mampu ditahan gedung (C) ditunjukkan dengan warna kuning utamanya pada kolom yang terletak pada bentang arah y sumbu global bangunan lebih banyak dibandingkan pada kolom yang terletak pada bentang arah x sumbu global bangunan. Sendi plastis akibat *pushover* arah x dan arah y pada model 1 dapat dilihat pada Gambar 5.63 hingga Gambar 5.66 berikut.



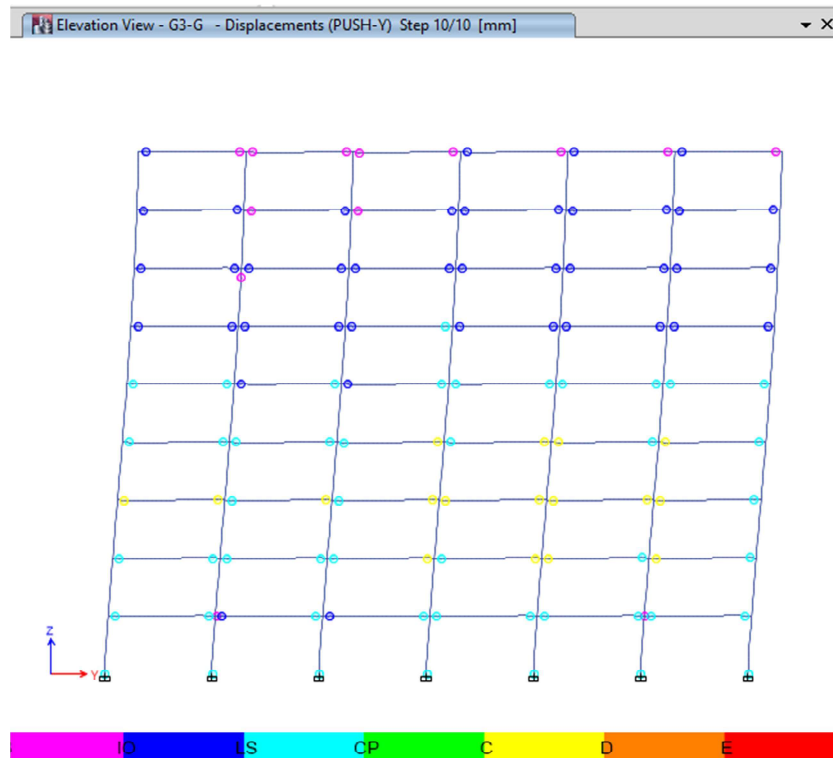
Gambar 5.63 Sendi Plastis Akibat *Pushover* Arah X Portal 7 Step 10 Model 1



Gambar 5.64 Sendi Plastis Akibat *Pushover* Arah X Portal C Step 10 Model 1



Gambar 5.65 Sendi Plastis Akibat *Pushover* Arah Y Portal 7 Step 10 Model 1



Gambar 5.66 Sendi Plastis Akibat *Pushover* Arah Y Portal C Step 10 Model 1

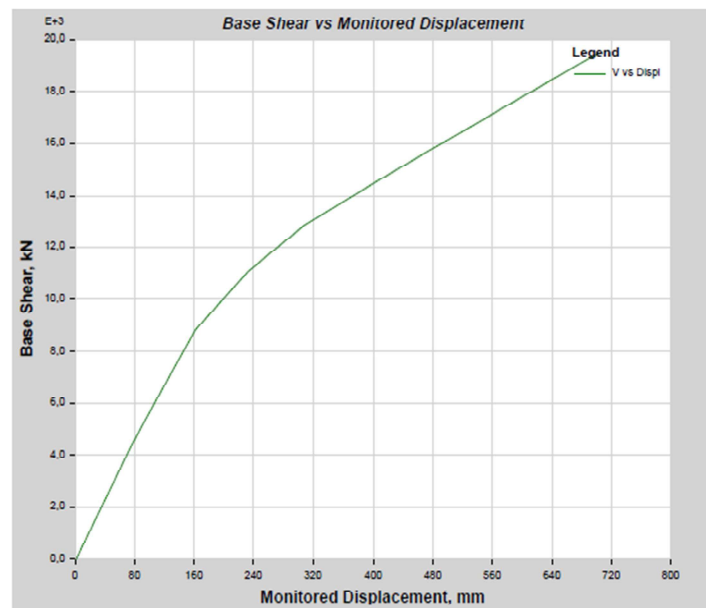
Hal tersebut terjadi karena pada model 1 kolom diletakkan memanjang arah x sumbu global, dimana bagian memanjang pada penampang kolom memiliki inersia yang besar dapat memberikan kekakuan yang juga besar sehingga lebih kuat dalam menahan gaya geser dasar, namun pada arah sebaliknya yaitu arah y sumbu global dimana kolom diletakkan memendek pada arah tersebut memiliki inersia yang kecil dan memberikan kekakuan yang juga kecil.

2. Model 2

Pada arah x, pembebanan lateral mulai diterapkan pada Step-1 sebesar 4058,1978 kN menghasilkan simpangan sebesar 71 mm. Analisis berhenti pada Step-11 dimana tercapai target simpangan pada 702,8 mm dengan beban lateral sebesar 19449,494 kN. besarnya gaya geser dasar dan simpangan titik acuan pada atap struktur pada Tabel 5.95 serta kurva kapasitas dapat dilihat pada Gambar 5.67 berikut.

Tabel 5.95 Gaya Geser Dasar dan Simpangan Arah X Model 2

| Step | Monitored Displ (mm) | Base Force (kN) |
|------|----------------------|-----------------|
| 0 | 0,8 | 0 |
| 1 | 71 | 4058,1978 |
| 2 | 89,1 | 5101,4758 |
| 3 | 161,1 | 8793,304 |
| 4 | 232,5 | 11072,9543 |
| 5 | 307,7 | 12815,6399 |
| 6 | 380,1 | 14097,5753 |
| 7 | 452,9 | 15343,9655 |
| 8 | 531,1 | 16646,4034 |
| 9 | 605 | 17884,0746 |
| 10 | 678,1 | 19069,0722 |
| 11 | 702,8 | 19449,4939 |

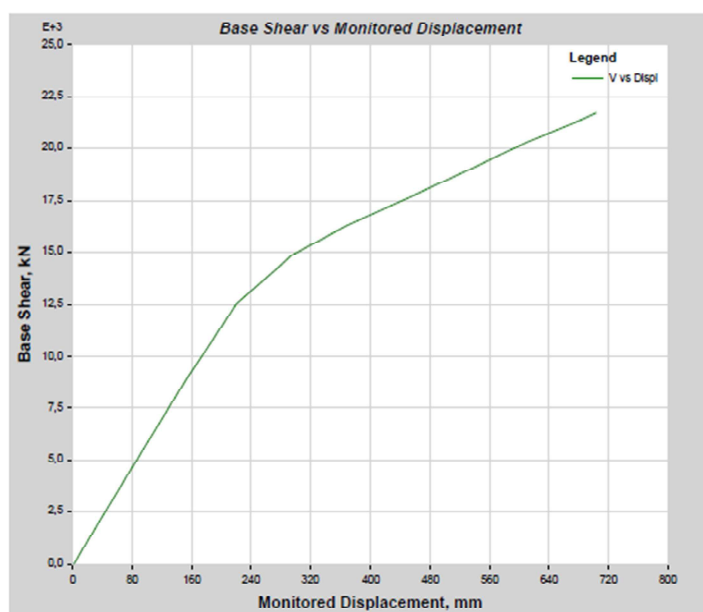


Gambar 5.67 Kurva Kapasitas Arah X Model 2

Pada arah y, pembebanan lateral mulai diterapkan pada Step-1 sebesar 4152,342 kN menghasilkan simpangan sebesar 71,6 mm. Analisis berhenti pada Step-11 dimana tercapai target simpangan pada 703,4 mm dengan beban lateral sebesar 21717,2735 kN. Besarnya gaya geser dasar dan simpangan pada titik acuan dapat dilihat pada Tabel 5.96 serta kurva kapasitas pada Gambar 5.68.

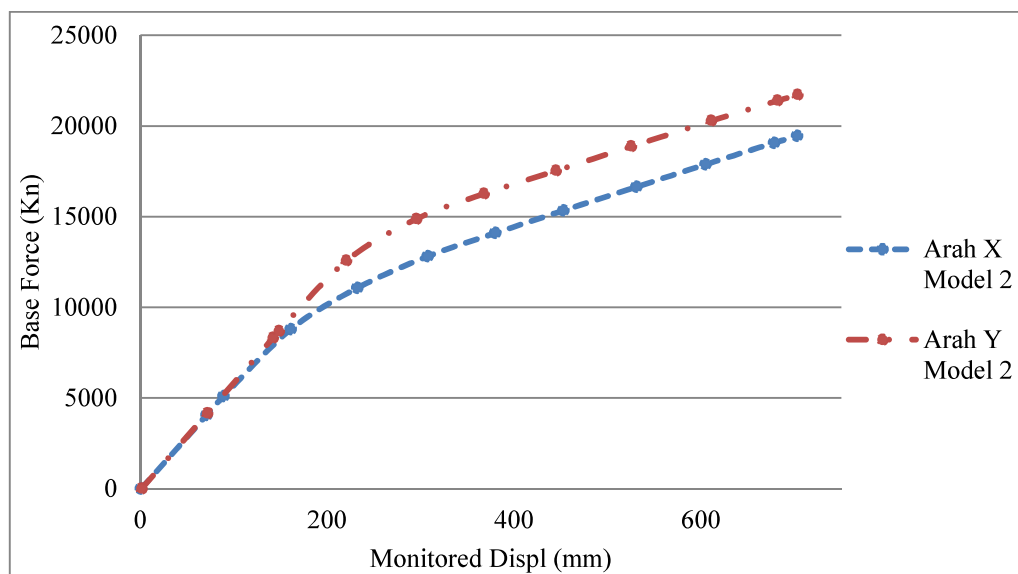
Tabel 5.96 Gaya Geser Dasar dan Simpangan Arah Y Model 2

| Step | Monitored Displ (mm) | Base Force (kN) |
|------|----------------------|-----------------|
| 0 | 1,4 | 0 |
| 1 | 71,6 | 4152,34 |
| 2 | 141,8 | 8304,68 |
| 3 | 148,3 | 8691,41 |
| 4 | 220,5 | 12566,08 |
| 5 | 295,2 | 14868,68 |
| 6 | 367,7 | 16257,59 |
| 7 | 444,7 | 17529,68 |
| 8 | 525 | 18864,79 |
| 9 | 610,8 | 20279,30 |
| 10 | 681,7 | 21388,30 |
| 11 | 703,4 | 21717,27 |



Gambar 5.68 Kurva Kapasitas Arah Y Model 2

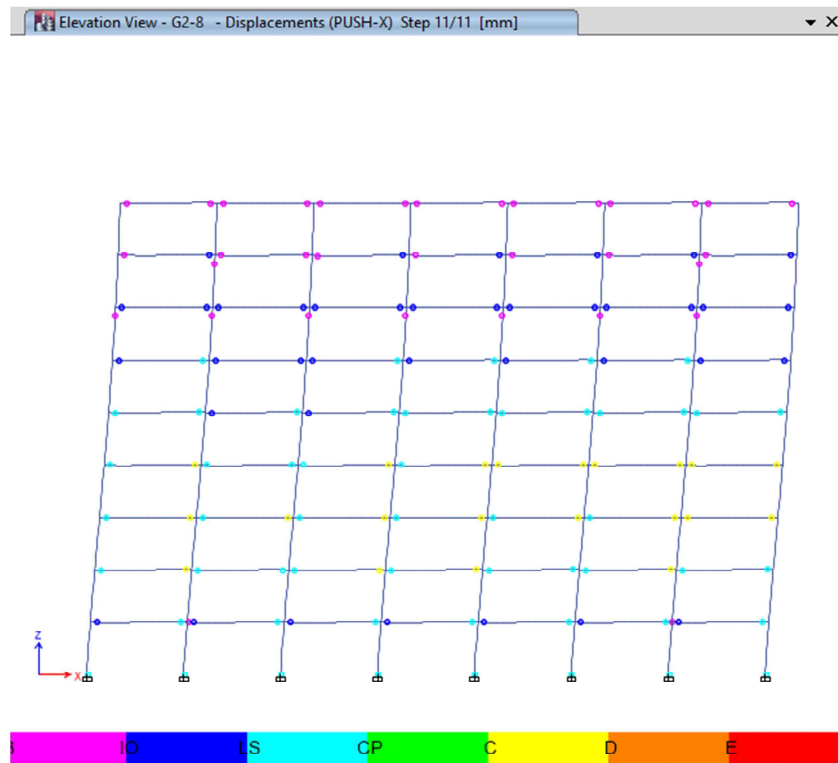
Perbandingan kurva kapasitas arah x dan arah y pada model 2 dapat dilihat pada Gambar 5.69 berikut.



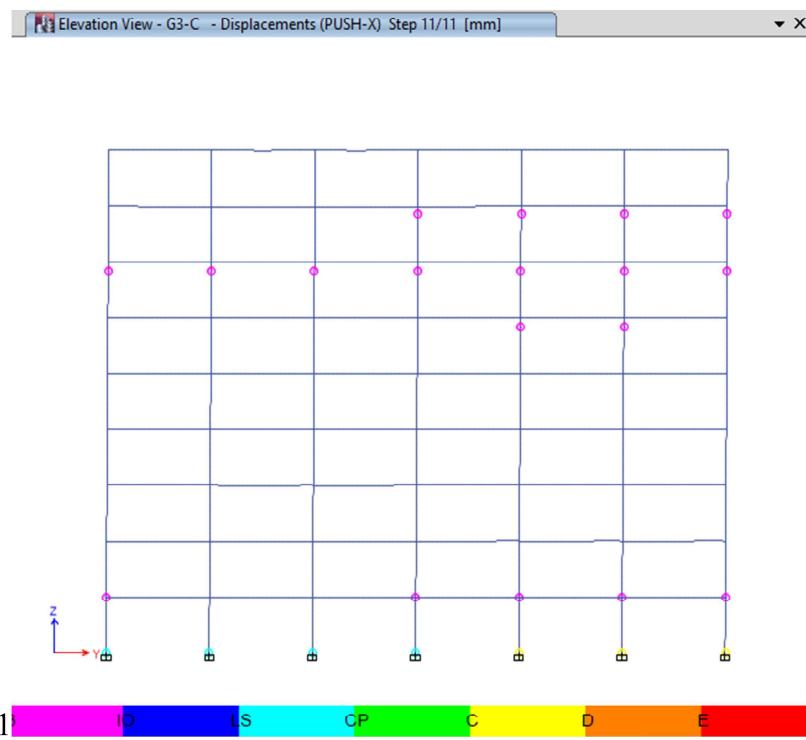
Gambar 5.69 Perbandingan Kurva Kapasitas Arah X dan Arah Y Model 2

Berdasarkan Gambar 5.69 terlihat bahwa *analysis pushover* pada kedua arah berhenti pada target *Monitored Displacement* yang telah ditentukan, yaitu sebesar 2% dari tinggi bangunan ($0,02 \times 3510 = 702$ mm).

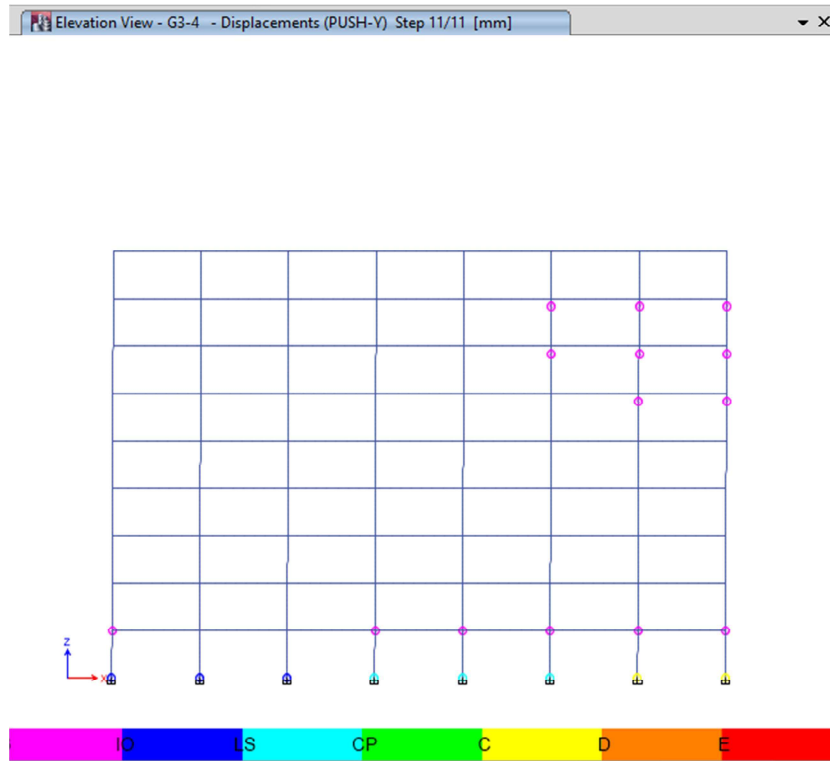
Pada Gambar 5.69 juga dapat dilihat bahwa gaya geser dasar arah y yang terjadi lebih besar daripada arah x, berarti pada model 2 arah y sumbu global bangunan lebih kuat dalam menahan gaya dasar daripada arah x sumbu global bangunan. Hal tersebut berkaitan dengan plastifikasi yang terjadi akibat analisis *pushover*, dimana kibat *pushover* arah x dan *pushover* arah y pada lantai yang sama dan step terakhir *pushover* plastifikasi tingkat batas maksimum gaya geser yang masih mampu ditahan gedung (C) ditunjukkan dengan warna kuning pada bentang arah x sumbu global bangunan utamanya pada kolom secara umum lebih banyak dibandingkan pada bentang arah y sumbu global bangunan. Sendi plastis akibat *pushover* arah x dan arah y pada model 2 dapat dilihat pada Gambar 5.70 hingga Gambar 5.73 berikut.



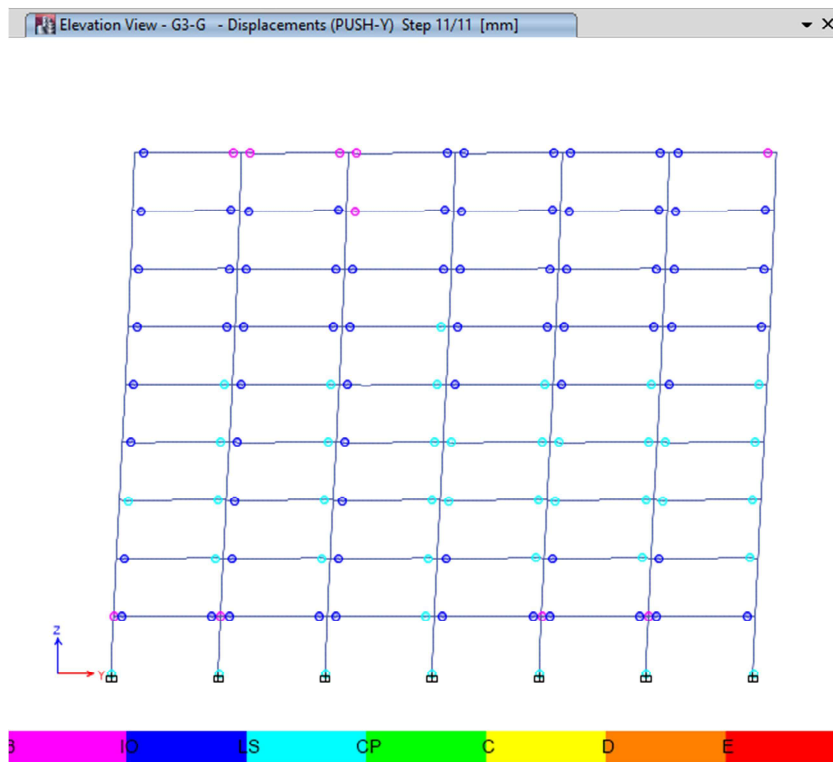
Gambar 5.70 Sendi Plastis Akibat *Pushover* Arah X Portal 7 Step 11 Model 2



Gambar 5.71 Sendi Plastis Akibat *Pushover* Arah X Portal C Step 10 Model 2



Gambar 5.72 Sendi Plastis Akibat *Pushover* Arah Y Portal 3 Step 11 Model 2



Gambar 5.73 Sendi Plastis Akibat *Pushover* Arah Y Portal G Step 11 Model 2

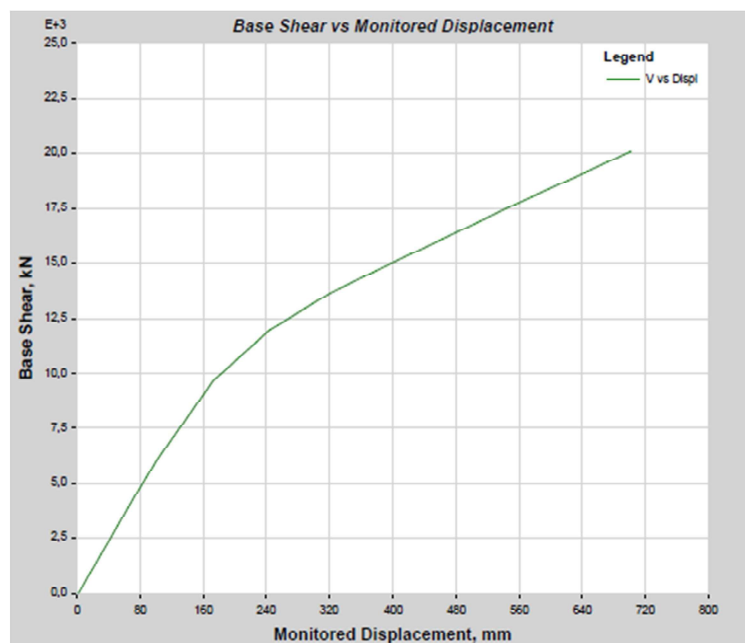
Hal tersebut terjadi karena pada model 2 kolom diletakkan memanjang arah y sumbu global, dimana bagian memanjang pada penampang kolom memiliki inersia yang besar dapat memberikan kekakuan yang juga besar sehingga lebih kuat dalam menahan gaya geser dasar, namun pada arah sebaliknya yaitu arah x sumbu global dimana kolom diletakkan memendek pada arah tersebut memiliki inersia yang kecil dan memberikan kekakuan yang juga kecil.

3. Model 3

Pada arah x, pembebanan lateral mulai diterapkan pada Step-1 sebesar 4247,13 kN menghasilkan simpangan sebesar 71 mm hal ini menunjukkan perubahan kondisi leleh pertama atau perubahan dari kondisi elastic menjadi inelastic. Analisis berhenti pada Step-10 dimana tercapai target simpangan pada 702,8 mm dengan beban lateral sebesar 20085,53 kN. besarnya gaya geser dasar dan simpangan titik acuan pada atap struktur pada Tabel 5.97 serta kurva kapasitas dapat dilihat pada Gambar 5.74.

Tabel 5.97 Gaya Geser Dasar dan Simpangan Arah X Model 3

| Step | <i>Monitored Displ</i> (mm) | <i>Base Force</i> (kN) |
|------|-----------------------------|------------------------|
| 0 | 0,8 | 0,00 |
| 1 | 71 | 4247,13 |
| 2 | 100,2 | 6011,56 |
| 3 | 172,1 | 9650,51 |
| 4 | 243,1 | 11972,57 |
| 5 | 319,1 | 13606,33 |
| 6 | 394,2 | 14941,64 |
| 7 | 478,6 | 16371,73 |
| 8 | 552,7 | 17620,40 |
| 9 | 629,9 | 18911,61 |
| 10 | 702,8 | 20085,53 |

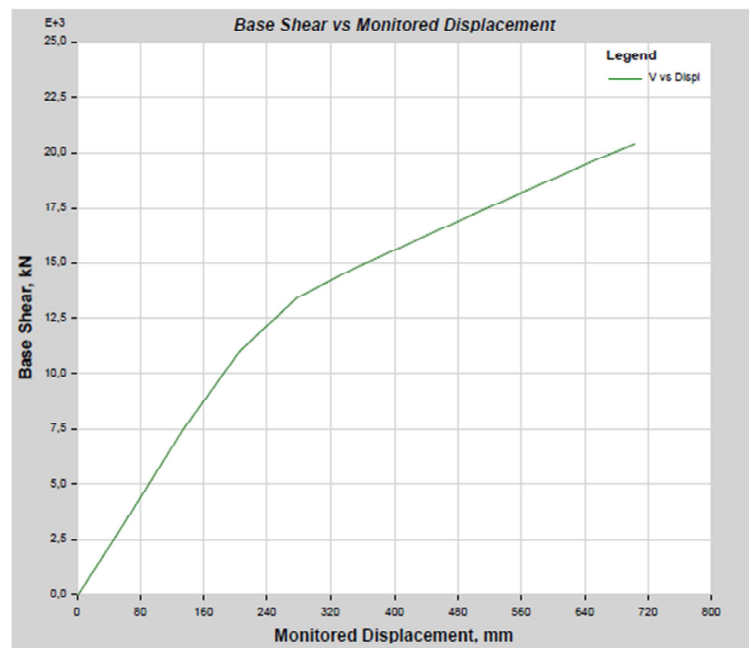


Gambar 5.74 Kurva Kapasitas Arah X Model 3

Pada arah y, pembebanan lateral mulai diterapkan pada Step-1 sebesar 3944,764 kN menghasilkan simpangan sebesar 71,6 mm. Analisis berhenti pada Step-10 dimana tercapai target simpangan pada 703,4 mm dengan beban lateral sebesar 20412,13 kN. Besarnya gaya geser dasar dan simpangan pada titik acuan dapat dilihat pada Tabel 5.98 serta kurva kapasitas pada Gambar 5.75.

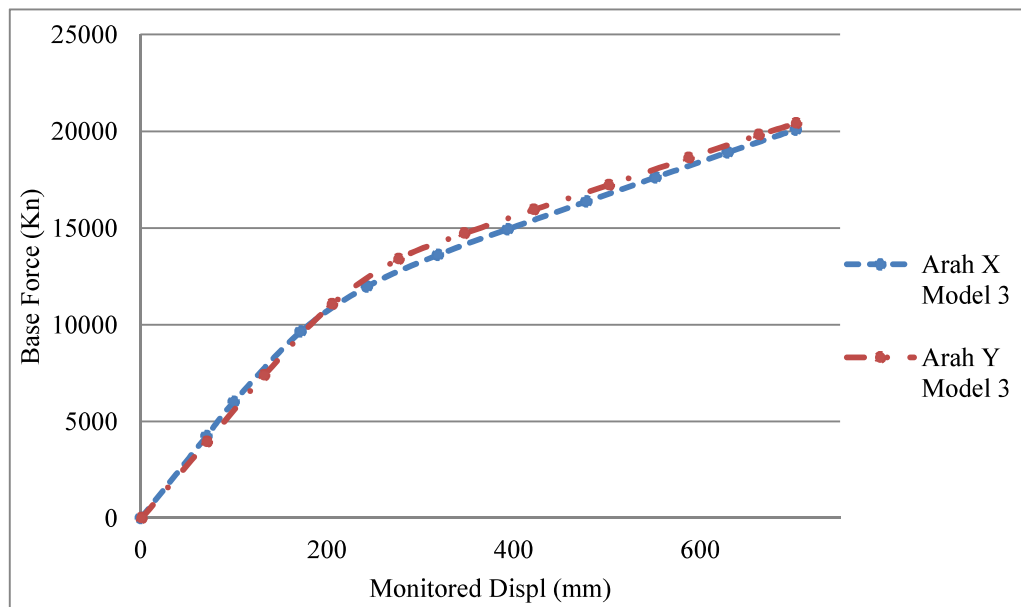
Tabel 5.98 Gaya Geser Dasar dan Simpangan Arah Y Model 3

| Step | <i>Monitored Displ</i> (mm) | <i>Base Force</i> (kN) |
|------|-----------------------------|------------------------|
| 0 | 1,4 | 0,00 |
| 1 | 71,6 | 3944,76 |
| 2 | 132,9 | 7391,02 |
| 3 | 205,6 | 11055,47 |
| 4 | 277,2 | 13397,41 |
| 5 | 347,5 | 14713,70 |
| 6 | 421,7 | 15938,96 |
| 7 | 502,5 | 17224,09 |
| 8 | 587,8 | 18619,09 |
| 9 | 663,2 | 19810,64 |
| 10 | 703,4 | 20412,13 |



Gambar 5.75 Kurva Kapasitas Arah Y Model 3

Perbandingan kurva kapasitas arah x dan arah y pada model 3 dapat dilihat pada Gambar 5.76 berikut.



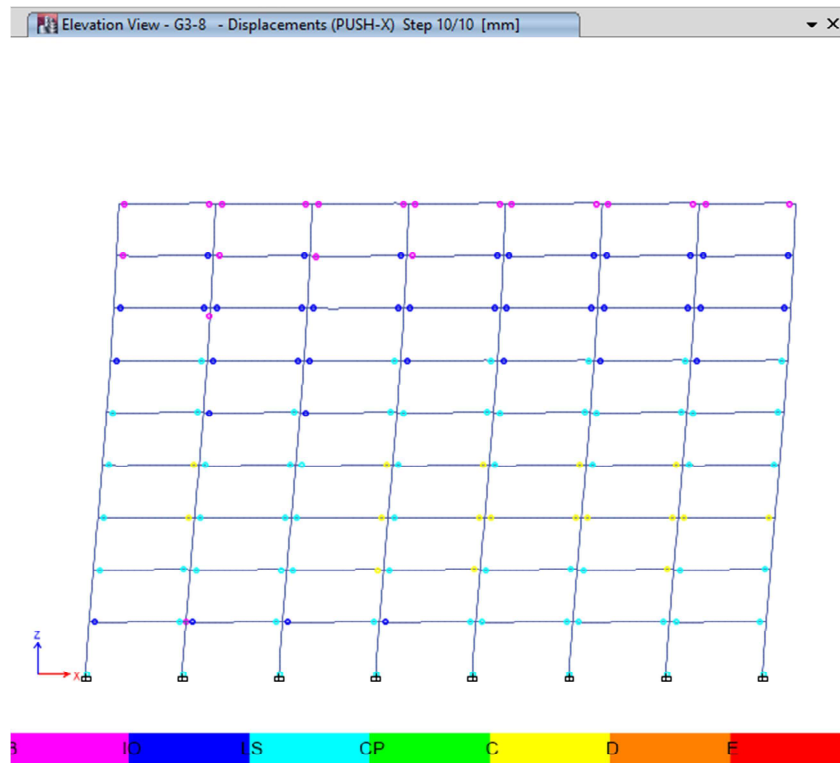
Gambar 5.76 Perbandingan Kurva Kapasitas Arah X dan Arah Y Model 3

Berdasarkan Gambar 5.76 terlihat bahwa *analysis pushover* pada kedua arah berhenti pada target *Monitored Displacement* yang telah ditentukan, yaitu sebesar 2% dari tinggi bangunan ($0,02 \times 3510 = 702$ mm).

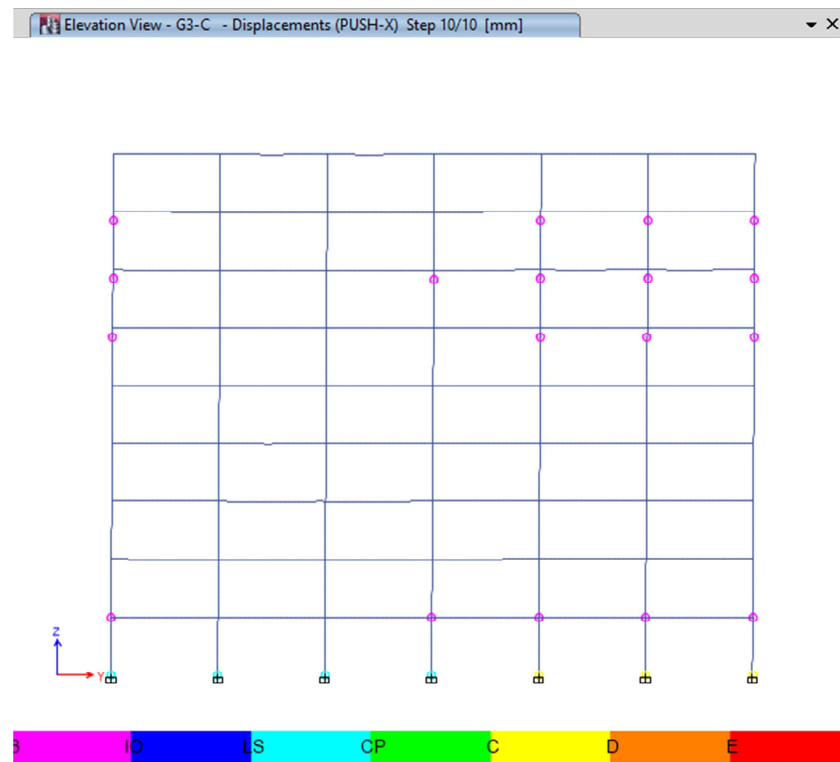
Pada Gambar 5.80 juga dapat dilihat kurva kapasitas pada kedua arah terjadi berhimpit, namun gaya geser dasar paling besar dapat ditahan pada arah y. berarti pada model 3 arah y sumbu global bangunan lebih kuat dalam menahan gaya geser daripada arah x sumbu global bangunan namun selisihnya tidak besar.

Hal tersebut berkaitan dengan plastifikasi yang terjadi akibat analisis *pushover*, dimana akibat *pushover* arah x pada lantai 4 dan step terakhir *pushover*, plastifikasi tingkat batas maksimum gaya geser yang masih mampu ditahan gedung (C) ditunjukkan dengan warna kuning pada bentang arah x sumbu global bangunan utamanya pada kolom secara umum lebih sedikit dibandingkan pada bentang arah y sumbu global bangunan.

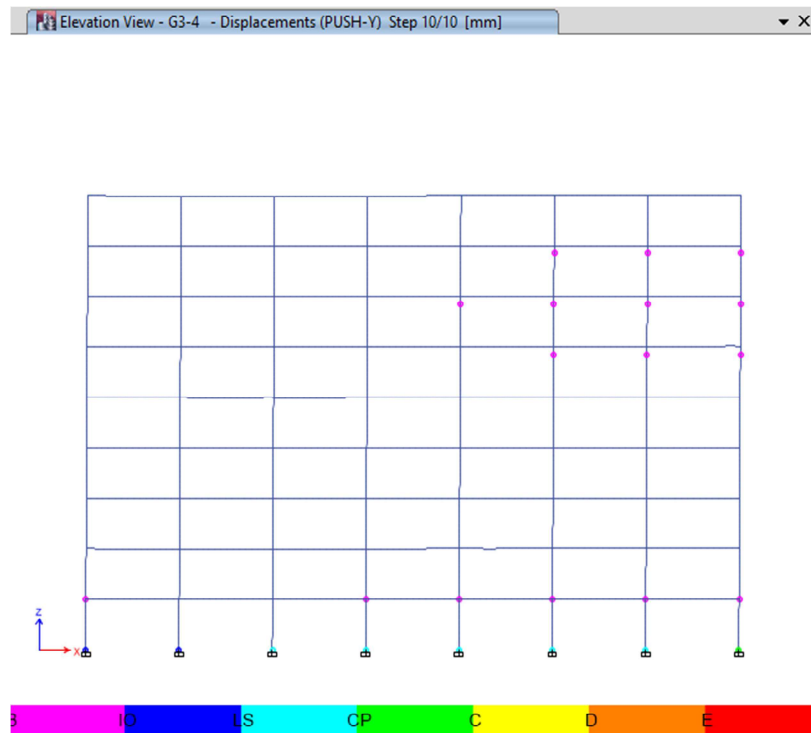
Sedangkan akibat *pushover* arah y pada lantai yang sama dan step terakhir *pushover*, plastifikasi tingkat batas maksimum gaya geser yang masih mampu ditahan gedung (C) ditunjukkan dengan warna kuning pada bentang arah y sumbu global bangunan utamanya pada kolom secara umum lebih sedikit dibandingkan pada bentang arah x sumbu global bangunan. Sendi plastis akibat *pushover* arah x dan arah y pada model 3 dapat dilihat pada Gambar 5.77 hingga Gambar 5.80 berikut.



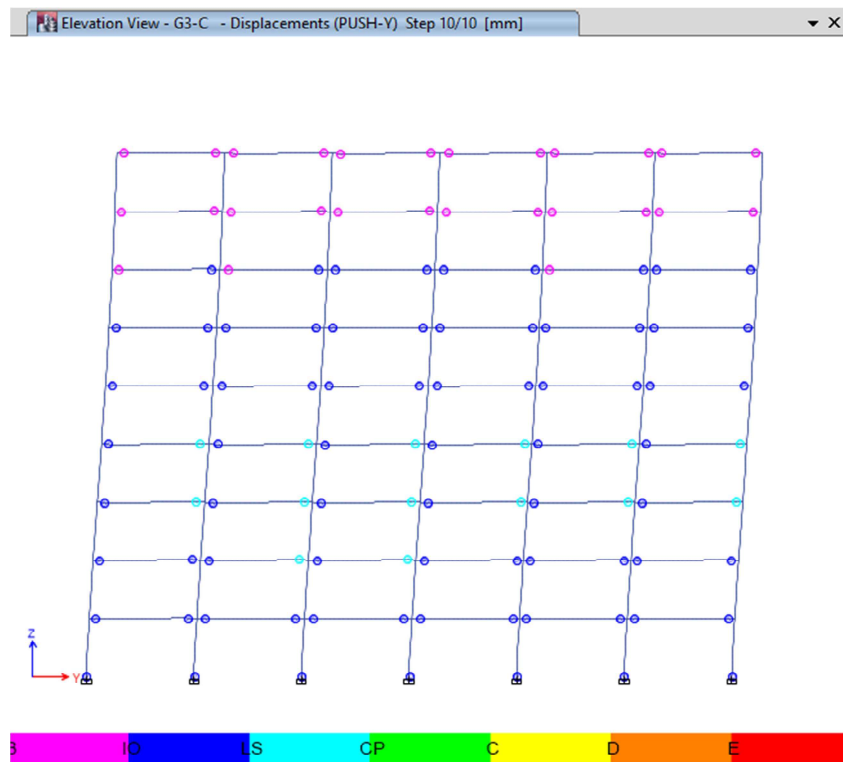
Gambar 5.77 Sendi Plastis Akibat *Pushover* Arah X Portal 7 Step 10 Model 3



Gambar 5.78 Sendi Plastis Akibat *Pushover* Arah X Portal C Step 10 Model 3



Gambar 5.79 Sendi Plastis Akibat *Pushover* Arah Y Portal 3 Step 10 Model 3



Gambar 5.80 Sendi Plastis Akibat *Pushover* Arah Y Portal C Step 10 Model 3

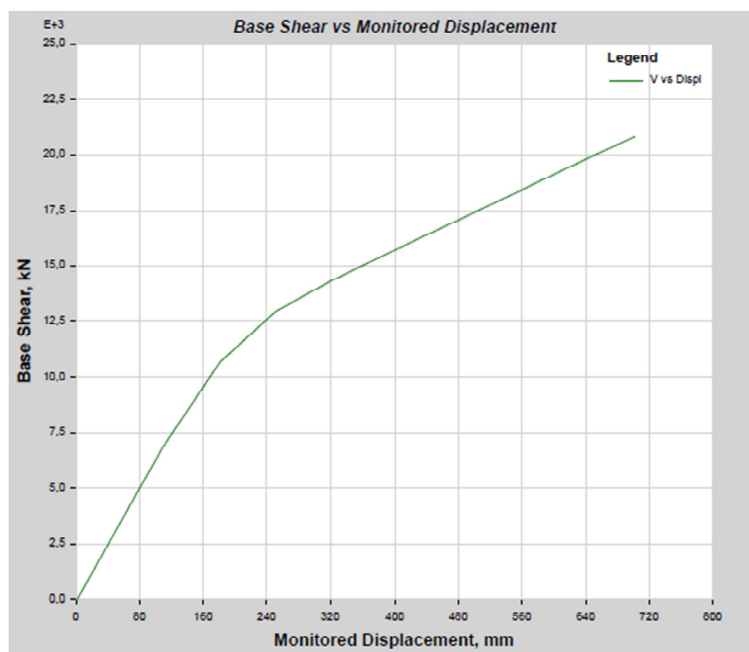
Hal tersebut terjadi karena pada model 3 kolom persegi panjang dikombinasikan memanjang arah y untuk bentang yang memanjang arah x dan penempatan kolom memanjang arah x untuk bentang yang memanjang arah y, yang berarti bagian memanjang pada penampang kolom yang memiliki inersia besar dapat memberikan kekakuan yang juga besar ditempatkan memanjang pada arah sumbu global yang bentangnya pendek dan nilai inersianya tidak besar. Sehingga pada model 3 dapat menahan gaya geser dasar secara lebih baik pada kedua arah karena nilai kekakuan yang tidak besar di satu arah tetapi juga tidak kecil di arah lainnya.

4. Model 4

Pada arah x, pembebanan lateral mulai diterapkan pada Step-1 sebesar 4412,84 kN menghasilkan simpangan sebesar 71 mm hal ini menunjukkan perubahan kondisi leleh pertama atau perubahan dari kondisi elastic menjadi inelastic. Analisis berhenti pada Step-11 dimana tercapai target simpangan pada 702,8 mm dengan beban lateral sebesar 20826,40 kN. besarnya gaya geser dasar dan simpangan titik acuan pada atap struktur pada Tabel 5.99 serta kurva kapasitas dapat dilihat pada Gambar 5.81.

Tabel 5.99 Gaya Geser Dasar dan Simpangan Arah X Model 4

| Step | <i>Monitored Displ</i> (mm) | <i>Base Force</i> (kN) |
|------|-----------------------------|------------------------|
| 0 | 0,80 | 0,00 |
| 1 | 71,00 | 4412,84 |
| 2 | 110,10 | 6870,30 |
| 3 | 181,70 | 10693,84 |
| 4 | 252,10 | 12983,84 |
| 5 | 324,10 | 14376,17 |
| 6 | 399,30 | 15688,43 |
| 7 | 473,20 | 16941,47 |
| 8 | 555,70 | 18369,87 |
| 9 | 631,80 | 19672,80 |
| 10 | 702,30 | 20819,25 |
| 11 | 702,80 | 20826,40 |

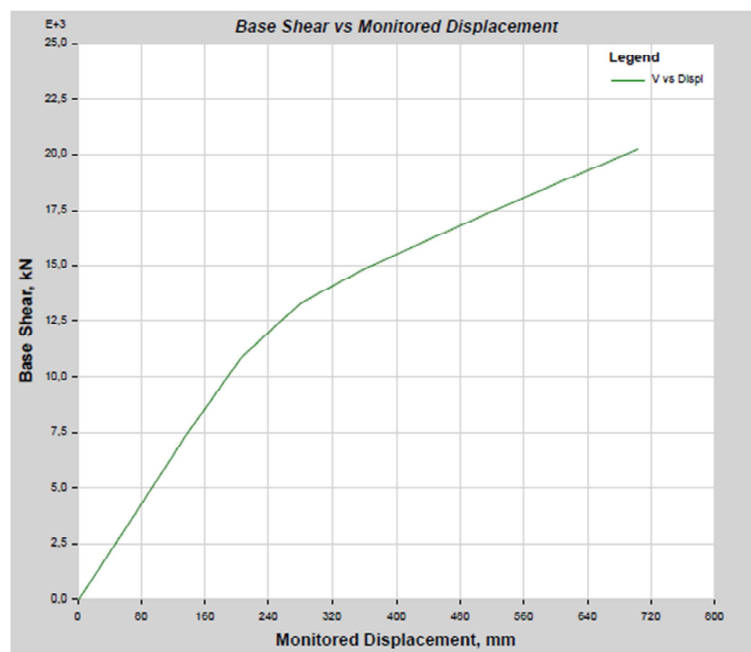


Gambar 5.81 Kurva Kapasitas Arah X Model 4

Pada arah y, pembebanan lateral mulai diterapkan pada Step-1 sebesar 3837,38 kN menghasilkan simpangan sebesar 71,6 mm. Analisis berhenti pada Step-10 dimana tercapai target simpangan pada 703,4 mm dengan beban lateral sebesar 20238,53 kN. Besarnya gaya geser dasar dan simpangan pada titik acuan dapat dilihat pada Tabel 5.100 serta kurva kapasitas pada Gambar 5.82.

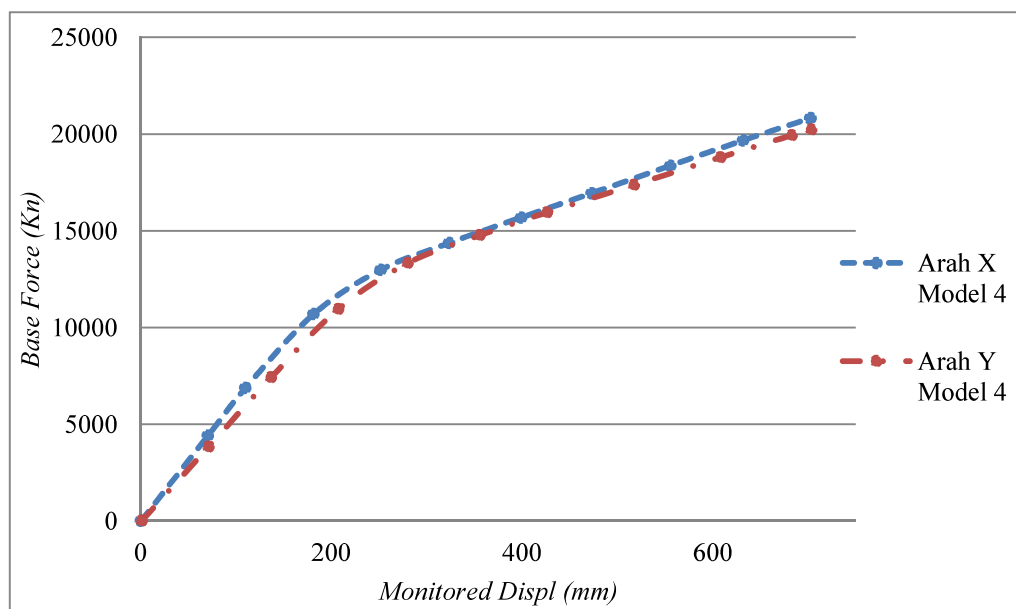
Tabel 5.100 Gaya Geser Dasar dan Simpangan Arah Y Model 4

| Step | Monitored Displ (mm) | Base Force (kN) |
|------|----------------------|-----------------|
| 0 | 1,40 | 0,00 |
| 1 | 71,60 | 3837,38 |
| 2 | 137,10 | 7417,79 |
| 3 | 207,50 | 10950,96 |
| 4 | 280,30 | 13327,02 |
| 5 | 355,80 | 14765,29 |
| 6 | 426,40 | 15946,72 |
| 7 | 517,60 | 17375,02 |
| 8 | 608,20 | 18798,39 |
| 9 | 682,90 | 19935,47 |
| 10 | 703,40 | 20238,53 |



Gambar 5.82 Kurva Kapasitas Arah Y Model 4

Perbandingan kurva kapasitas arah x dan arah y pada model 4 dapat dilihat pada Gambar 5.83 berikut.

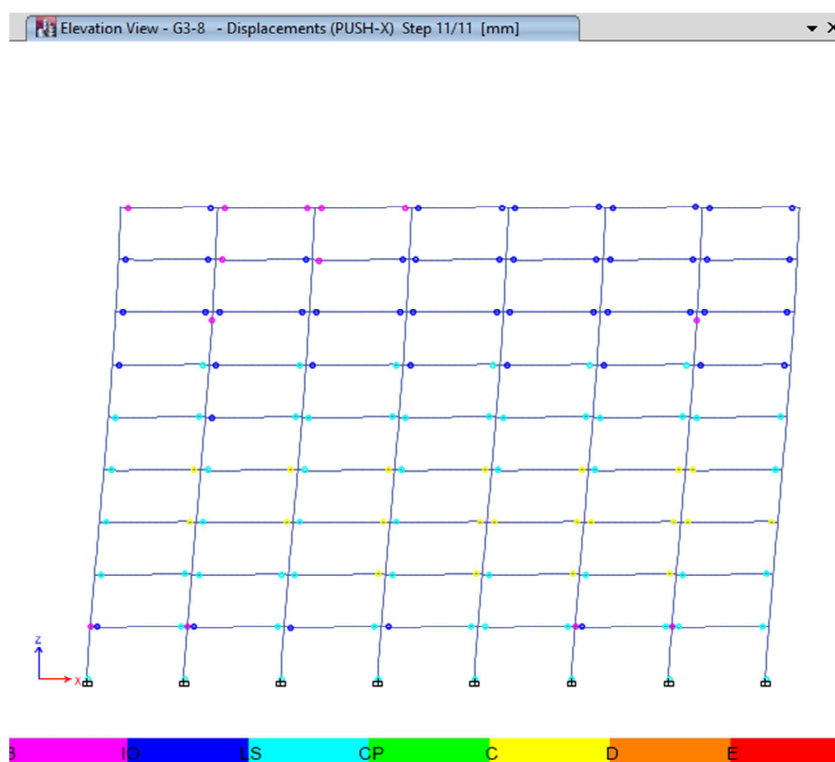


Gambar 5.83 Perbandingan Kurva Kapasitas Arah X dan Arah Y Model 4

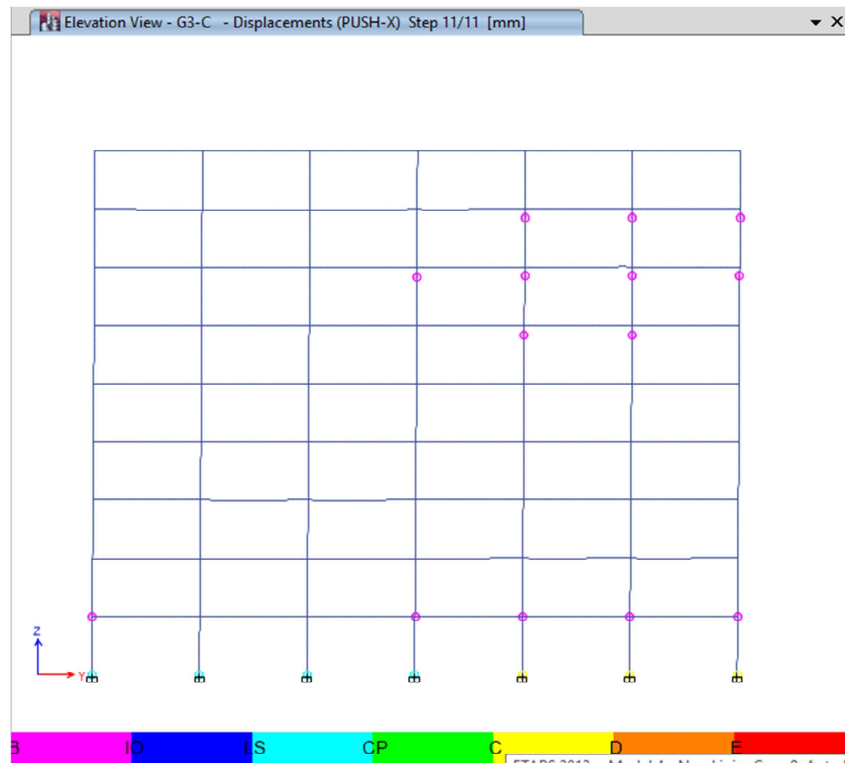
Berdasarkan Gambar 5.83 terlihat bahwa *analysis pushover* pada kedua arah berhenti pada target *Monitored Displacement* yang telah ditentukan, yaitu sebesar 2% dari tinggi bangunan ($0,02 \times 3510 = 702$ mm).

Pada Gambar 5.90 juga dapat dilihat kurva kapasitas pada kedua arah terjadi berhimpit, namun gaya geser dasar paling besar dapat ditahan pada arah x. berarti pada model 4 arah x sumbu global bangunan lebih kuat dalam menahan gaya dasar daripada arah y sumbu global bangunan namun selisihnya tidak besar.

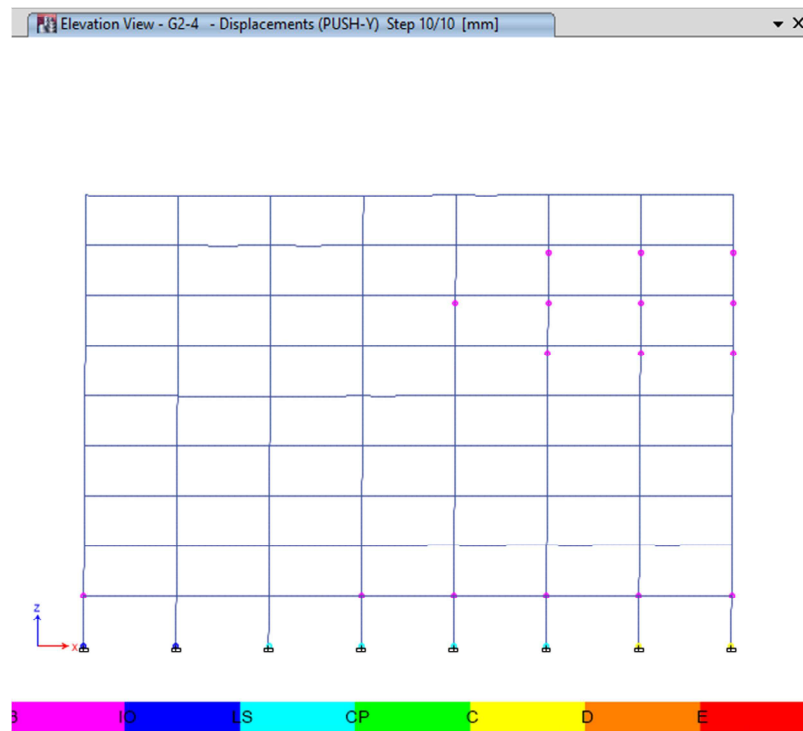
Hal tersebut berkaitan dengan plastifikasi yang terjadi akibat analisis *pushover*, dimana akibat *pushover* arah x dan arah y pada lantai yang sama dan step terakhir *pushover*, plastifikasi tingkat batas maksimum gaya geser yang masih mampu ditahan gedung (C) ditunjukkan dengan warna kuning pada bentang arah x sumbu global secara umum lebih sedikit dibandingkan pada bentang arah y sumbu global bangunan. Sendi plastis akibat *pushover* arah x dan arah y pada model 4 dapat dilihat pada Gambar 5.84 dan Gambar 5.87 berikut.



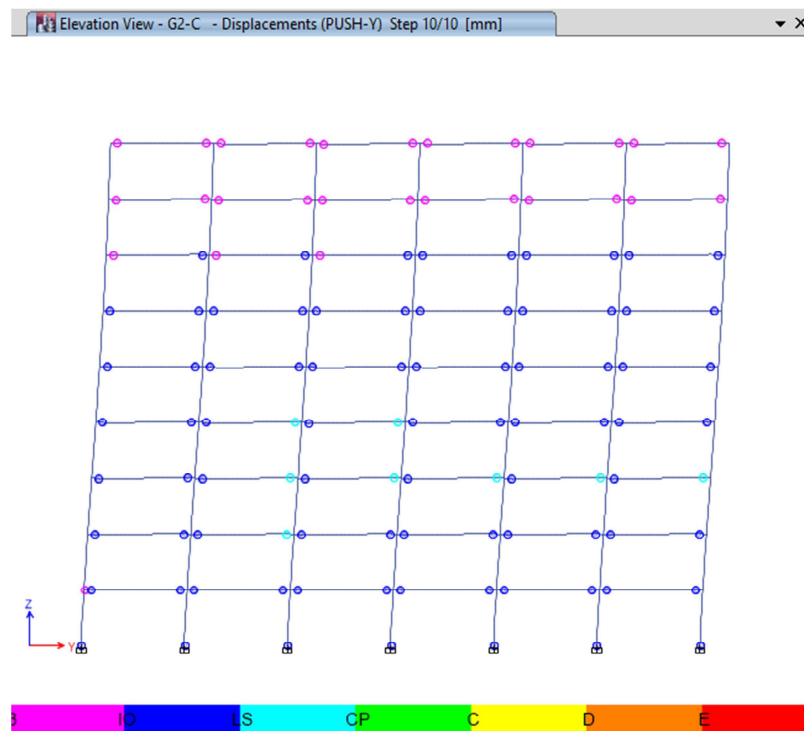
Gambar 5.84 Sendi Plastis Akibat *Pushover* Arah X Portal 7 Step 11 Model 4



Gambar 5.85 Sendi Plastis Akibat *Pushover* Arah X Portal C Step 11 Model 4



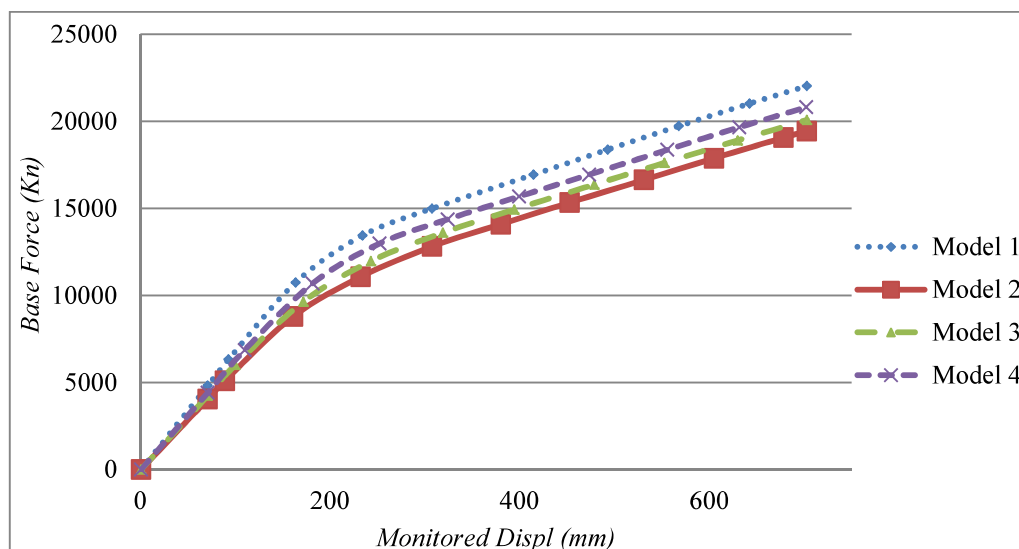
Gambar 5.86 Sendi Plastis Akibat *Pushover* Arah Y Portal 3 Step 10 Model 4



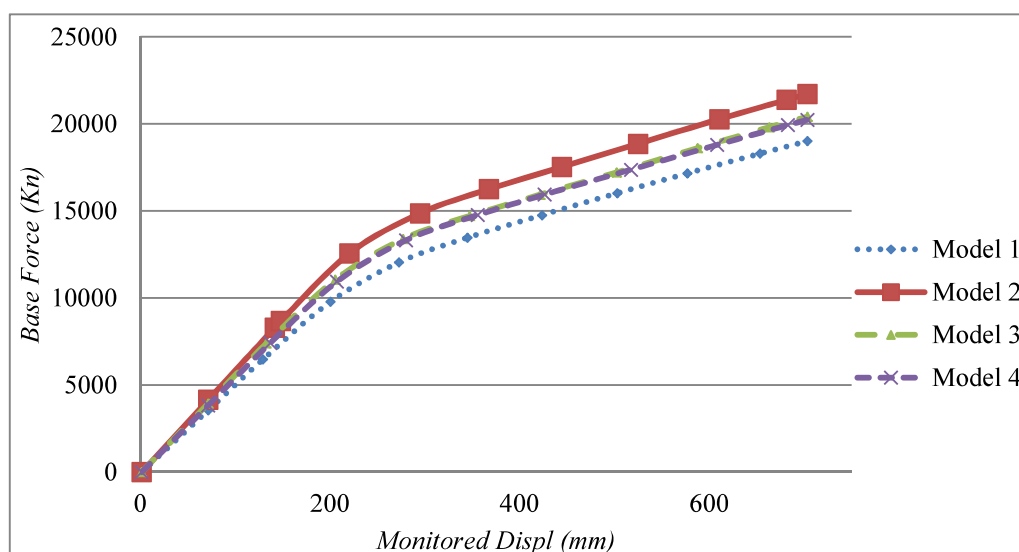
Gambar 5.87 Sendi Plastis Akibat *Pushover* Arah Y Portal C Step 10 Model 4

Hal tersebut terjadi karena pada model 4 dimana digunakan kolom bujur sangkar, yang berarti penampang kolom di kedua arah memiliki inersia yang sama sehingga kekakuan dipengaruhi dari bentang struktur dimana bentang struktur memanjang pada arah x memiliki nilai inersia yang besar sehingga pada arah tersebut lebih kaku dalam menahan simpangan daripada arah sebaliknya yaitu pada arah y.

Selanjutnya dapat dibandingkan kurva kapasitas hasil *pushover* analysis dari semua model yang ditinjau pada arah x dan arah y yang dapat dilihat pada Gambar 5.88 dan Gambar 5.89 berikut.



Gambar 5.88 Perbandingan Kurva Kapasitas Arah X Semua Model



Gambar 5.89 Perbandingan Kurva Kapasitas Arah Y Semua Model

Berdasarkan Gambar 5.88 dan Gambar 5.89 dapat disimpulkan Model yang dapat menahan gaya geser dasar arah x paling besar adalah model 1 dimana pada model tersebut menggunakan kolom persegi panjang ditempatkan memanjang arah x sumbu global bangunan, sedangkan model yang dapat menahan gaya geser dasar arah y paling besar adalah model 2 dimana pada model tersebut menggunakan kolom persegi panjang ditempatkan memanjang arah y sumbu global bangunan.

Hal tersebut terjadi karena bagian memanjang pada penampang kolom memiliki nilai inersia sebesar $89766241200,00 \text{ mm}^4$ dalam hal ini penempatan kolom pada model 1 memanjang arah x sumbu global dan pada model 2 memanjang arah y akan memberikan nilai kekakuan yang besar sehingga mampu menahan gaya geser dasar yang juga besar pada arah tersebut, namun pada arah sebaliknya dimana pada model 1 arah y dan pada model 2 arah x memberikan nilai kekakuan yang kecil karena memiliki nilai inersia sebesar $43290046875,00 \text{ mm}^4$ dimana lebih kecil dari arah memanjang pada penampang kolom sehingga kurang kuat dalam menahan gaya geser dasar pada arah tersebut.

Pada model 3 dimana penempatan kolom persegi panjang dikombinasikan memanjang arah y untuk bentang yang memanjang arah x dan penempatan kolom memanjang arah x untuk bentang yang memanjang arah y, menunjukkan gaya geser dasar yang lebih baik pada kedua arah, artinya tidak besar di satu arah tetapi juga tidak kecil di arah lainnya. Hal ini terjadi karena bagian memanjang pada penampang kolom persegi panjang yang memiliki inersia besaran memberikan kekakuan yang besar, ditempatkan memanjang pada bentang struktur yang pendek dimana memiliki inersia yang kecil dan kurang kaku. Begitu juga pada arah sebaliknya sehingga struktur dapat menahan gaya geser yang besar di kedua arah.

Pada model 4 dimana digunakan kolom bujur sangkar gaya geser dasar yang mampu ditahan pada arah x lebih besar daripada arah y, hal ini karena penampang kolom di kedua arah memiliki inersia yang sama sehingga kekakuan dipengaruhi dari bentang struktur dimana bentang struktur memanjang pada arah x memiliki nilai inersia sebesar $2,139 \times 10^7 \text{ mm}^4$ sehingga pada arah tersebut lebih kaku dalam menahan gaya geser dasar daripada arah sebaliknya yaitu pada arah y yang memiliki inersia sebesar $1,233 \times 10^7 \text{ mm}^4$. Besarnya nilai kekakuan semua model diperoleh dari modifikasi kurva kapasitas menjadi kurva bilinear yang akan dijelaskan pada sub bab berikutnya.

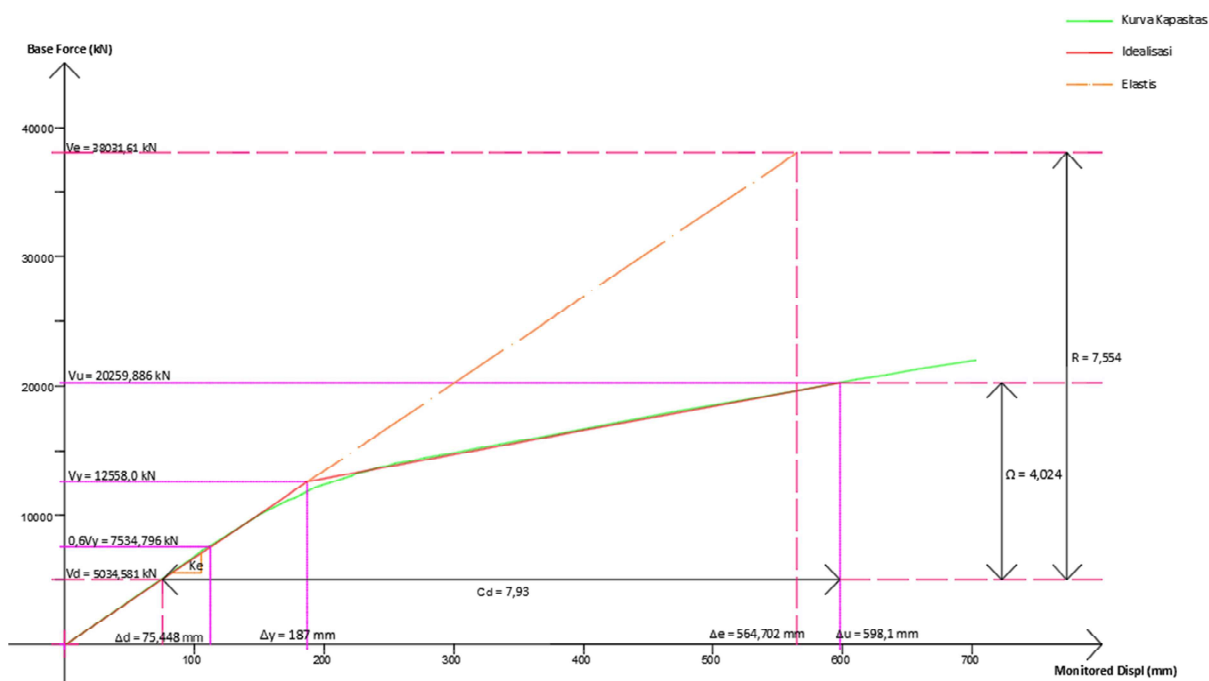
5.7.2 Daktilitas Simpangan

Nilai daktilitas simpangan diperoleh lewat modifikasi kurva kapasitas hasil *pushover analysis* menjadi kurva bilinear, modifikasi dapat dilakukan dengan metode *displacement modification (FEMA 440)* yang sudah *built-in* pada program ETABS 2013. Selain nilai daktilitas, dari kurva bilinear juga dapat diperoleh nilai kekakuan efektif (K_e) yang merupakan kekakuan secant yang dihitung dari gaya geser dasar sebesar 60% dari kuat geser leleh (V_y).

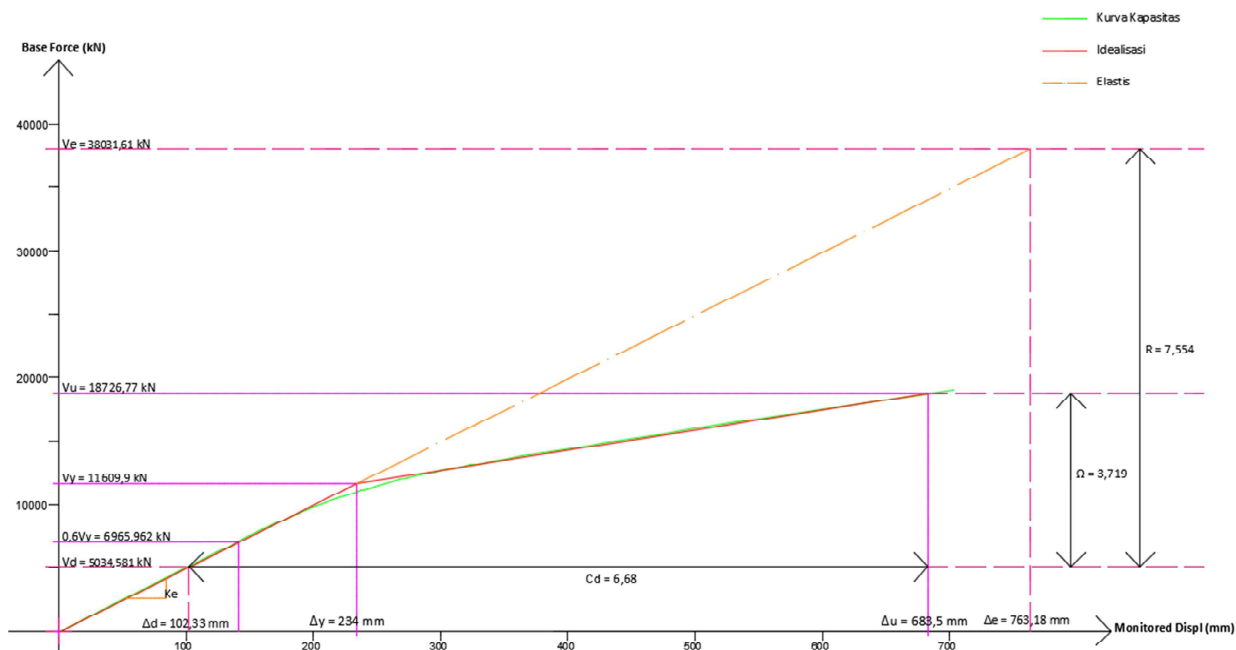
Untuk memperoleh kurva bilinear dan nilai kekakuan efektif, terlebih dahulu melakukan input parameter percepatan gempa pada perioda pendek 0,2 detik (S_s) serta parameter percepatan gempa pada perioda 1 detik (S_1) sesuai dengan persyaratan yang digunakan yaitu SNI 1726:2012.

1. Model 1

Hasil modifikasi kurva bilinear pada model 1 arah x dan arah y diperlihatkan pada Gambar 5.90 dan Gambar 5.91 berikut.



Gambar 5.90 Modifikasi Kurva Bilinear Arah X Model 1



Gambar 5.91 Modifikasi Kurva Bilinier Arah Y Model 1

Berdasarkan Gambar 5.90 dan Gambar 5.91 dapat diketahui untuk pembebanan arah x kondisi leleh tercapai pada saat gaya lateral $V_y = 12558,0 \text{ kN}$ dan menghasilkan simpangan $\Delta_y = 187 \text{ mm}$, sedangkan kondisi ultimit tercapai pada saat gaya lateral $V_u = 20259,886 \text{ kN}$ dan menghasilkan simpangan sebesar $\Delta_u = 598,1 \text{ mm}$ sehingga dapat diperoleh nilai daktilitas simpangan melalui persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \mu\Delta &= \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \\ &= \frac{598,1}{187} \\ &= 3,198 \end{aligned}$$

Untuk pembebanan arah y nilai daktilitas simpangan dihitung dengan cara yang sama sehingga perhitungan daktilitas simpangan model 1 arah x dan arah y dapat dilihat pada Tabel 5.101 berikut.

Tabel 5.101 Daktilitas Simpangan Model 1

| | Arah Pembebanan | |
|-----------------|-----------------|----------|
| | x | y |
| V_y (kN) | 12558,0 | 11609,9 |
| Δ_y (mm) | 187 | 234 |
| V_u (kN) | 20259,886 | 18726,77 |
| Δ_u (mm) | 598,1 | 683,5 |
| $\mu\Delta$ | 3,198 | 2,921 |

Daktilitas simpangan pada pembebanan arah x sebesar 3,198 dan pada arah y sebesar 2,921. Berdasarkan hubungan antara gaya dan simpangan pada Gambar 3.6, maka dari nilai daktilitas simpangan struktur model 1 termasuk dalam level *fully ductile response* atau struktur dalam taraf daktilitas penuh. Selain nilai daktilitas, diperoleh juga nilai kekakuan efektif serta parameter respon struktur yaitu, faktor reduksi gaya (R), faktor pembesaran defleksi (Cd), faktor kuat lebih (Ω) untuk masing-masing arah pada Tabel 5.102 berikut.

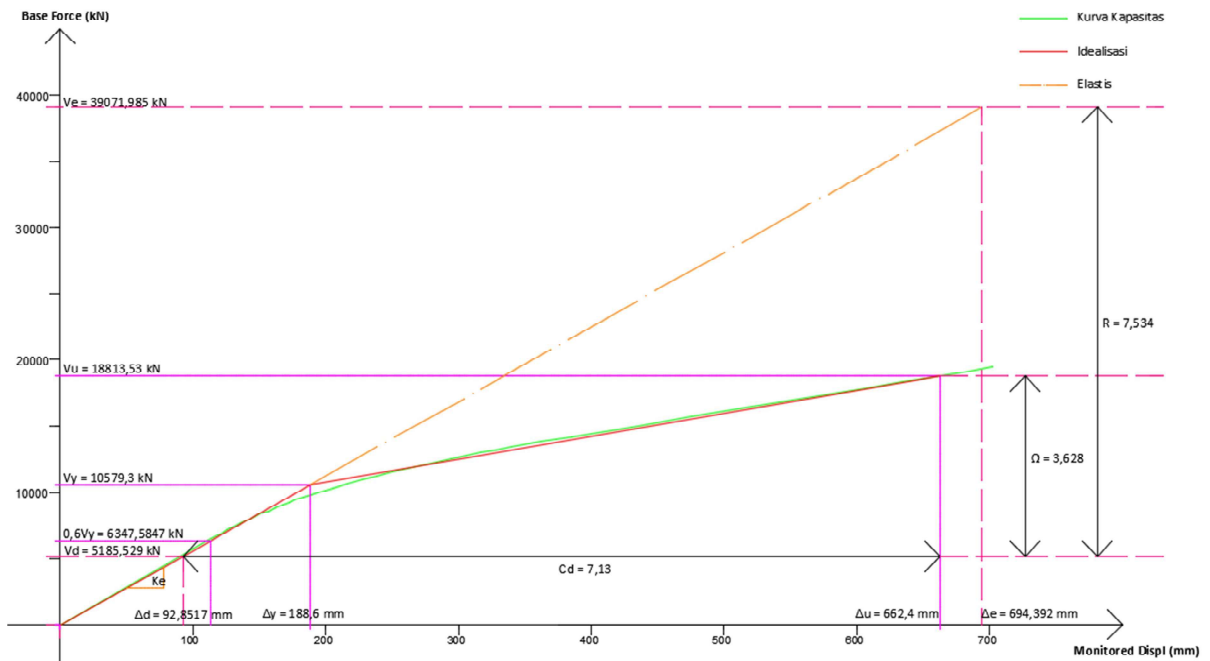
Tabel 5.102 Kekakuan Efektif dan Parameter Respon Struktur Model 1

| | Arah Pembebanan | |
|--------------|-----------------|-----------|
| | x | y |
| K_e (kN/m) | 67150,625 | 49624,921 |
| R | 7,554 | 7,554 |
| Cd | 7,927 | 6,679 |
| Ω | 4,024 | 3,720 |

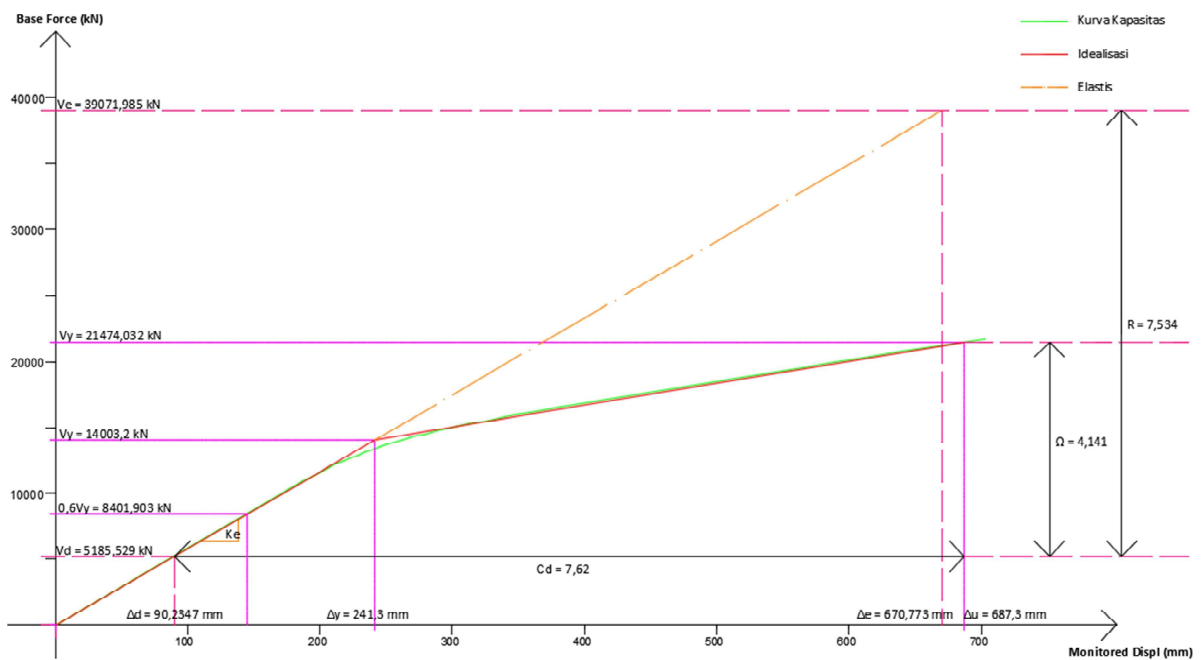
Berdasarkan Tabel 5.102 diatas, nilai kekakuan arah x lebih besar daripada kekakuan arah y. Hal ini berkaitan dengan penempatan bagian memanjang yang memiliki inersia yang besar, pada model 1 ditempatkan memanjang arah x sumbu global sehingga memberikan kekakuan yang juga besar serta mampu menahan simpangan antar lantai dan gaya geser dasar pada arah tersebut.

2. Model 2

Hasil modifikasi kurva bilinear pada model 2 arah x dan arah y diperlihatkan pada Gambar 5.92 dan Gambar 5.93 berikut.



Gambar 5.92 Modifikasi Kurva Bilinear Arah X Model 2



Gambar 5.93 Modifikasi Kurva Bilinear Arah Y Model 2

Dari modifikasi kurva bilinear diperoleh nilai gaya lateral dan simpangan pada saat kondisi leleh tercapai serta pada saat ultimit, sehingga dapat diperoleh nilai daktilitas simpangan dengan cara yang sama seperti model sebelumnya. Perhitungan daktilitas simpangan model 2 arah x dan arah y dapat dilihat pada Tabel 5.103 berikut.

Tabel 5.103 Daktilitas Simpangan Model 2

| | Arah Pembebanan | |
|-----------------|-----------------|-----------|
| | x | y |
| V_y (kN) | 10579,308 | 14003,172 |
| Δ_y (mm) | 188,600 | 241,300 |
| V_u (kN) | 18813,530 | 21474,032 |
| Δ_u (mm) | 662,400 | 687,300 |
| $\mu\Delta$ | 3,512 | 2,848 |

Daktilitas simpangan pada pembebanan arah x sebesar 3,512 dan pada arah y sebesar 2,848. Berdasarkan hubungan antara gaya dan simpangan pada Gambar 3.6, maka dari nilai daktilitas simpangan struktur model 2 termasuk dalam level *fully ductile response* atau struktur dalam taraf daktilitas penuh. Selain nilai daktilitas, diperoleh juga nilai kekakuan efektif serta parameter respon struktur yaitu, faktor reduksi gaya (R), faktor pembesaran defleksi (Cd), faktor kuat lebih (Ω) untuk masing-masing arah pada Tabel 5.104 berikut.

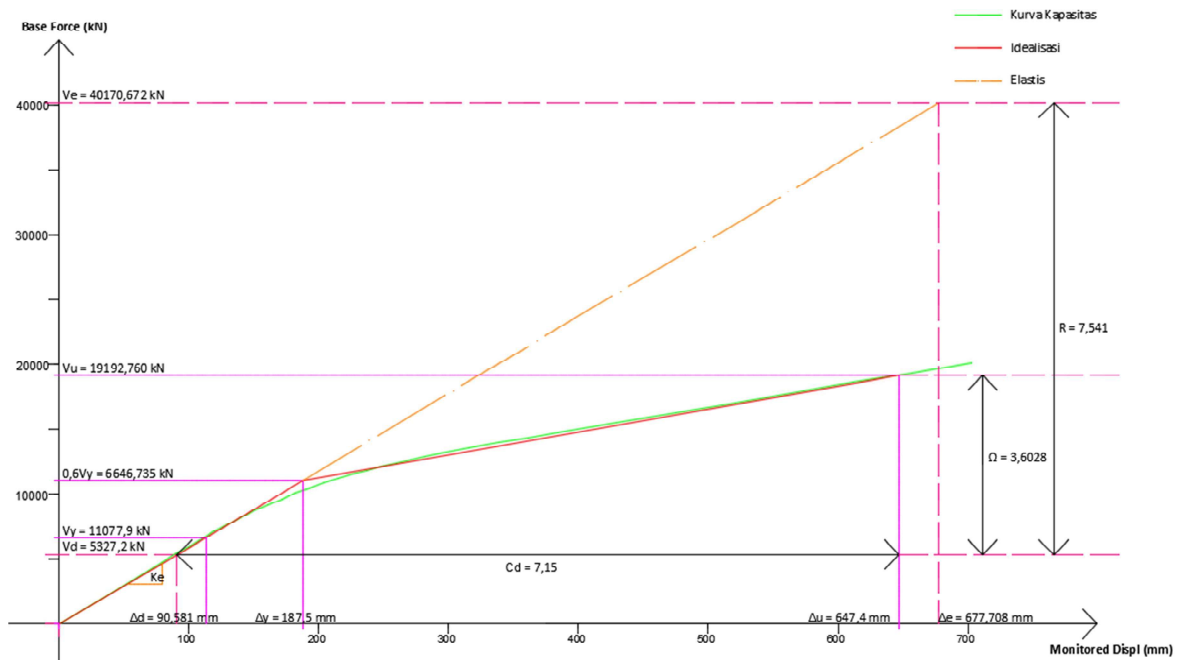
Tabel 5.104 Kekakuan Efektif dan Parameter Respon Struktur Model 2

| | Arah Pembebanan | |
|--------------|-----------------|-----------|
| | x | y |
| K_e (kN/m) | 56079,034 | 58022,272 |
| R | 7,535 | 7,535 |
| Cd | 7,134 | 7,617 |
| Ω | 3,628 | 4,141 |

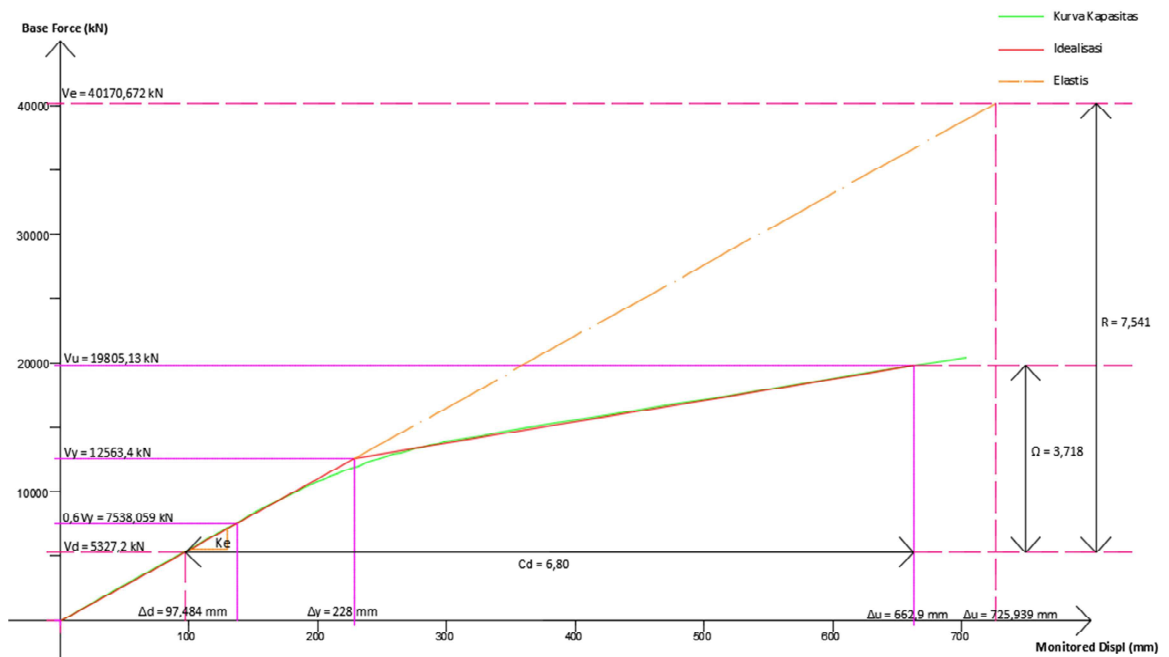
Berdasarkan Tabel 5.104 diatas, nilai kekakuan arah y lebih besar daripada kekakuan arah x. Hal ini berkaitan dengan penempatan bagian memanjang yang memiliki inersia yang besar, pada model 2 ditempatkan memanjang arah y sumbu global sehingga memberikan kekakuan yang juga besar serta mampu menahan simpangan antar lantai dan gaya geser dasar pada arah tersebut.

3. Model 3

Hasil modifikasi kurva bilinear pada model 3 arah x dan arah y diperlihatkan pada Gambar 5.94 dan Gambar 5.95 berikut.



Gambar 5.94 Modifikasi Kurva Bilinear Arah X Model 3



Gambar 5.95 Modifikasi Kurva Bilinear Arah Y Model 3

Dari modifikasi kurva bilinear diperoleh nilai gaya lateral dan simpangan pada saat kondisi leleh tercapai serta pada saat ultimit, sehingga dapat diperoleh nilai daktilitas simpangan dengan cara yang sama seperti model sebelumnya. Perhitungan daktilitas simpangan model 3 arah x dan arah y dapat dilihat pada Tabel 5.105 berikut.

Tabel 5.105 Daktilitas Simpangan Model 3

| | Arah Pembebanan | |
|-----------------|-----------------|-----------|
| | x | y |
| V_y (kN) | 11077,892 | 12563,432 |
| Δ_y (mm) | 187,500 | 228,000 |
| V_u (kN) | 19192,760 | 19805,131 |
| Δ_u (mm) | 647,400 | 662,900 |
| $\mu\Delta$ | 3,453 | 2,907 |

Daktilitas simpangan pada pembebanan arah x sebesar 3,512 dan pada arah y sebesar 2,848. Berdasarkan hubungan antara gaya dan simpangan pada Gambar 3.6, maka dari nilai daktilitas simpangan struktur model 3 termasuk dalam level *fully ductile response* atau struktur dalam taraf daktilitas penuh. Selain nilai daktilitas, diperoleh juga nilai kekakuan efektif serta parameter respon struktur yaitu, faktor reduksi gaya (R), faktor pembesaran defleksi (Cd), faktor kuat lebih (Ω) untuk masing-masing arah pada Tabel 5.106 berikut.

Tabel 5.106 Kekakuan Efektif dan Parameter Respon Struktur Model 3

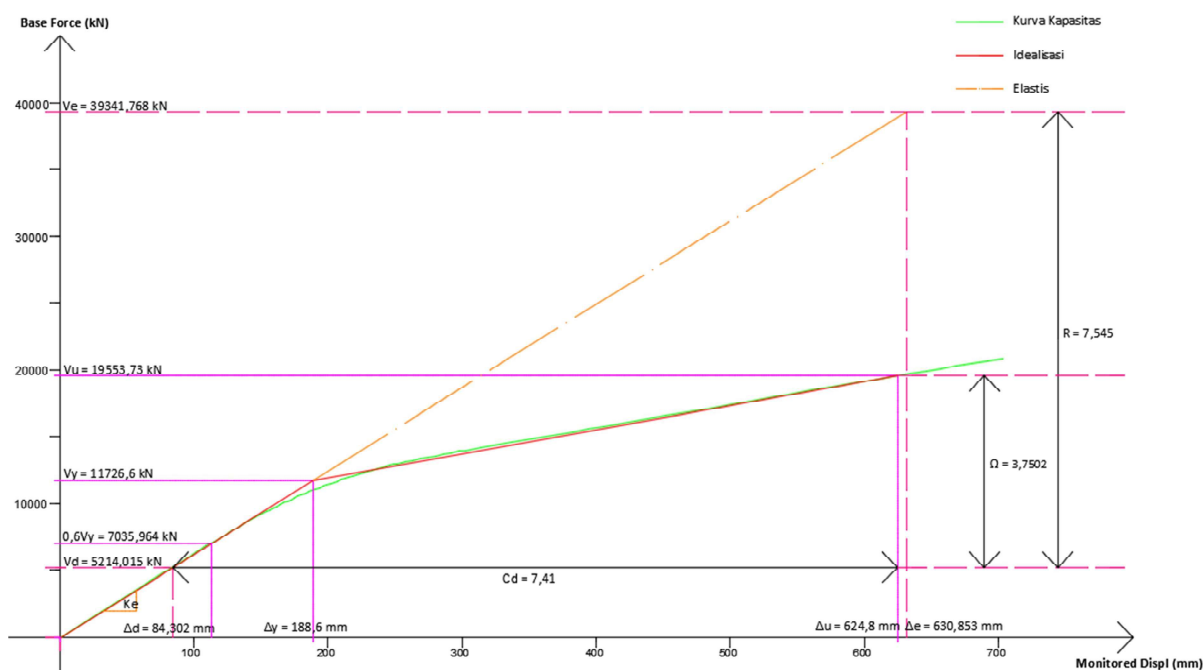
| | Arah Pembebanan | |
|--------------|-----------------|----------|
| | x | y |
| K_e (kN/m) | 59090,788 | 55111,29 |
| R | 7,54 | 7,54 |
| Cd | 7,15 | 6,80 |
| Ω | 3,60 | 3,72 |

Berdasarkan Tabel 5.106 diatas, nilai kekakuan arah x lebih besar daripada kekakuan arah y namun namun selisihnya tidak besar. Hal ini berkaitan dengan bentang arah x lebih panjang dan memiliki inersia yang lebih besar daripada bentang arah y sehingga kekakuan arah x lebih besar daripada arah y.

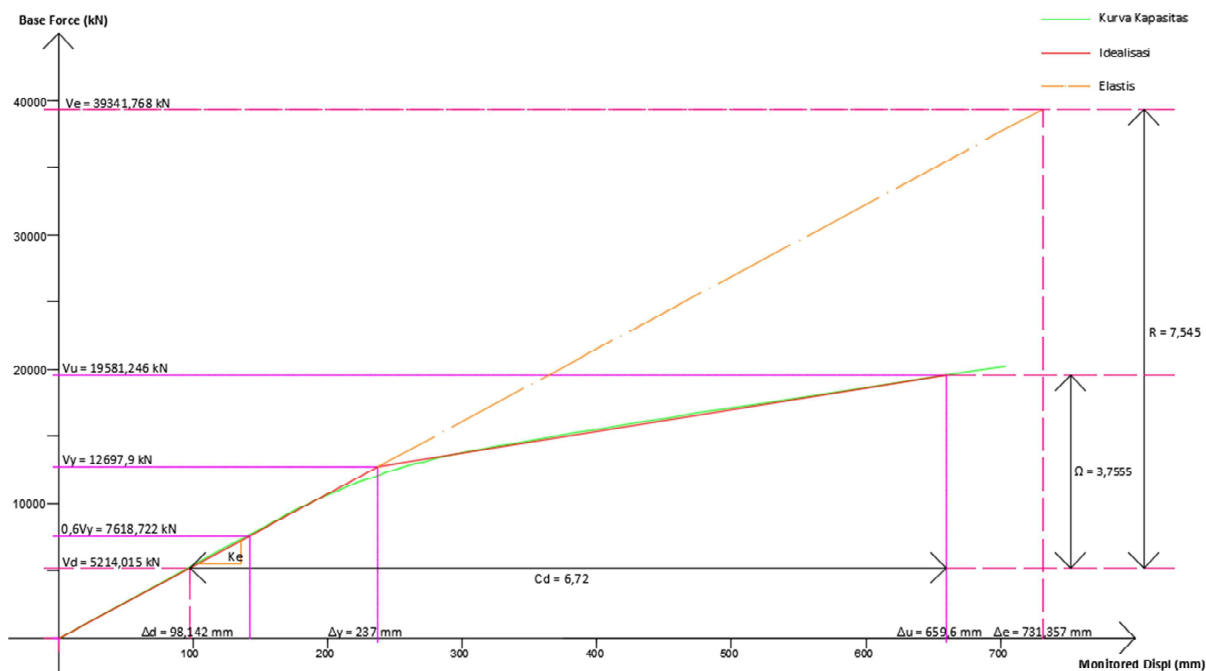
Namun penempatan kolom persegi panjang dikombinasikan memanjang arah y untuk bentang yang memanjang arah x dan penempatan kolom memanjang arah x untuk bentang yang memanjang arah y membuat selisih kekakuan antara kedua arah tidak besar karena bagian memanjang pada penampang kolom persegi panjang yang memiliki inersia besar akan memberikan kekakuan yang juga besar, ditempatkan memanjang pada bentang struktur yang pendek dimana memiliki inersia yang kecil dan kurang kaku dalam menahan gaya geser dasar.

4. Model 4

Hasil modifikasi kurva bilinear pada model 3 arah x dan arah y diperlihatkan pada Gambar 5.96 dan Gambar 5.97 berikut.



Gambar 5.96 Modifikasi Kurva Bilinear Arah X Model 4



Gambar 5.97 Modifikasi Kurva Bilinier Arah Y Model 4

Dari modifikasi kurva bilinier dapat diperoleh nilai daktilitas simpangan dengan cara yang sama seperti model sebelumnya. Perhitungan daktilitas simpangan model 4 arah x dan arah y dapat dilihat pada Tabel 5.107 berikut.

Tabel 5.108 Daktilitas Simpangan Model 4

| | Arah Pembebanan | |
|-----------------|-----------------|-----------|
| | x | y |
| V_v (kN) | 11726,607 | 12697,870 |
| Δ_v (mm) | 188,600 | 237,000 |
| V_u (kN) | 19553,732 | 19581,246 |
| Δ_u (mm) | 624,800 | 659,600 |
| $\mu\Delta$ | 3,313 | 2,783 |

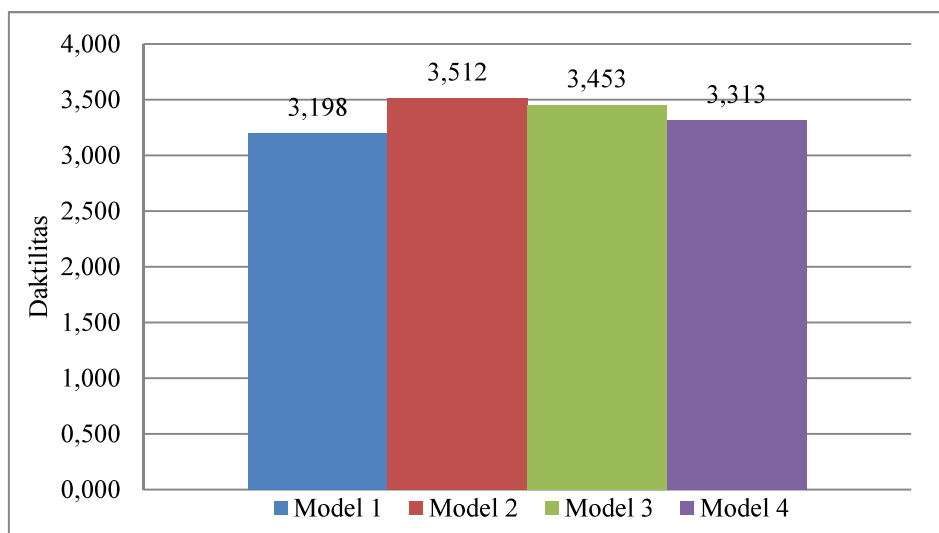
Daktilitas simpangan pada pembebanan arah x sebesar 3,313 dan pada arah y sebesar 2,783. Berdasarkan hubungan antara gaya dan simpangan pada Gambar 3.6, maka dari nilai daktilitas simpangan struktur model 4 termasuk dalam level *fully ductile response* atau struktur dalam taraf daktilitas penuh. Selain nilai daktilitas, diperoleh juga nilai kekakuan efektif serta parameter respon struktur yaitu, faktor reduksi gaya (R), faktor pembesaran defleksi (Cd), faktor kuat lebih (Ω) untuk masing-masing arah pada Tabel 5.109 berikut.

Tabel 5.109 Kekakuan Efektif dan Parameter Respon Struktur Model 4

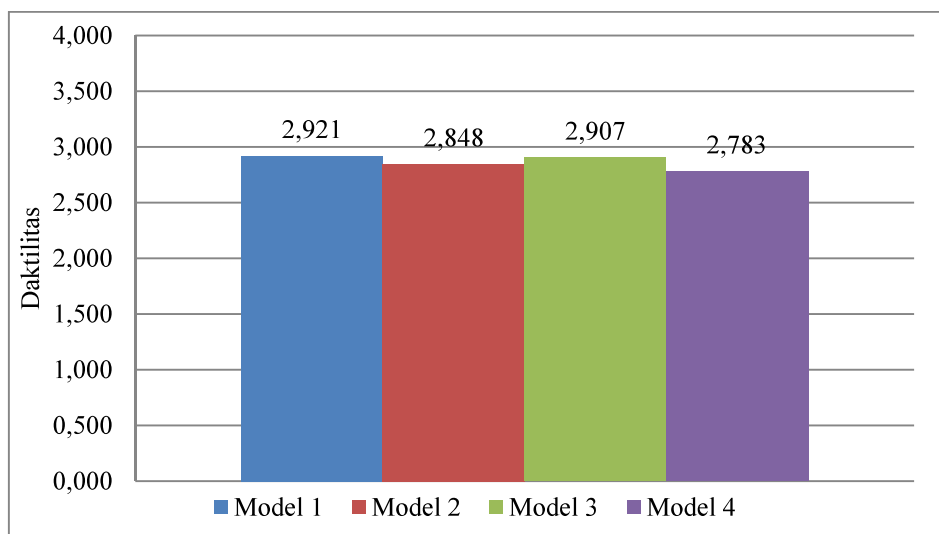
| | Arah Pembebanan | |
|-----------|-----------------|----------|
| | x | y |
| Ke (kN/m) | 62162,726 | 53578,25 |
| R | 7,55 | 7,55 |
| Cd | 7,41 | 6,72 |
| Ω | 3,75 | 3,76 |

Berdasarkan Tabel 5.109 diatas, nilai kekakuan arah x lebih besar daripada kekakuan arah y namun namun selisihnya tidak besar. Hal ini berkaitan dengan pada model 4 menggunakan penampang kolom bujur sangkar dimana penampang kolom di kedua arah penampang memiliki inersia yang sama sehingga kekakuan dipengaruhi dari bentang struktur dimana bentang struktur memanjang pada arah x memiliki nilai inersia yang besar sehingga pada arah tersebut memiliki nilai kekakuan yang lebih besar daripada arah sebaliknya yaitu pada arah y.

Selanjutnya dapat dibandingkan nilai daktilitas dari semua model yang ditinjau pada arah x dan arah y yang dapat dilihat pada Gambar 5.98 dan Gambar 5.99 berikut.



Gambar 5.98 Perbandingan Daktilitas Semua Model Pembebanan Arah X



Gambar 5.99 Perbandingan Daktilitas Semua Model Pembebanan Arah Y

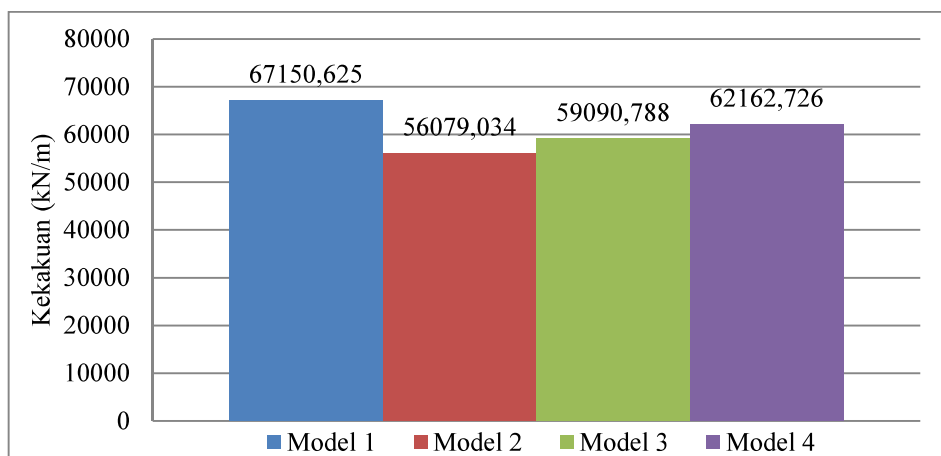
Berdasarkan Gambar 5.98, dapat disimpulkan model yang memiliki nilai daktilitas pada arah x paling besar diantara model yang lain adalah model 2 dimana pada model tersebut menggunakan kolom persegi panjang ditempatkan memanjang arah y sumbu global bangunan dengan nilai daktilitas 3,512. Sedangkan dari Gambar 5.99 dapat disimpulkan bahwa model yang memiliki nilai daktilitas pada arah y paling besar dibandingkan model lain adalah model 1 dimana pada model tersebut menggunakan kolom persegi panjang ditempatkan memanjang arah x sumbu global bangunan dengan nilai daktilitas 2,921.

Hal tersebut berkaitan dengan penempatan bagian memanjang penampang kolom pada arah bentang struktur akan memberikan nilai inersia yang besar pada arah bentang tersebut, dalam hal ini pada model 2 kolom ditempatkan memanjang arah y sumbu global dan model 1 kolom ditempatkan memanjang arah x sumbu global sehingga memberikan kekakuan yang juga besar pada arah tersebut. namun pada arah sebaliknya dimana pada model 1 arah y dan pada model 2 arah x memberikan nilai inersia yang kecil sehingga kurang kaku dan lebih mampu mengalami deformasi lateral yang besar sehingga pada arah tersebut memiliki nilai daktilitas paling besar diantara model lainnya.

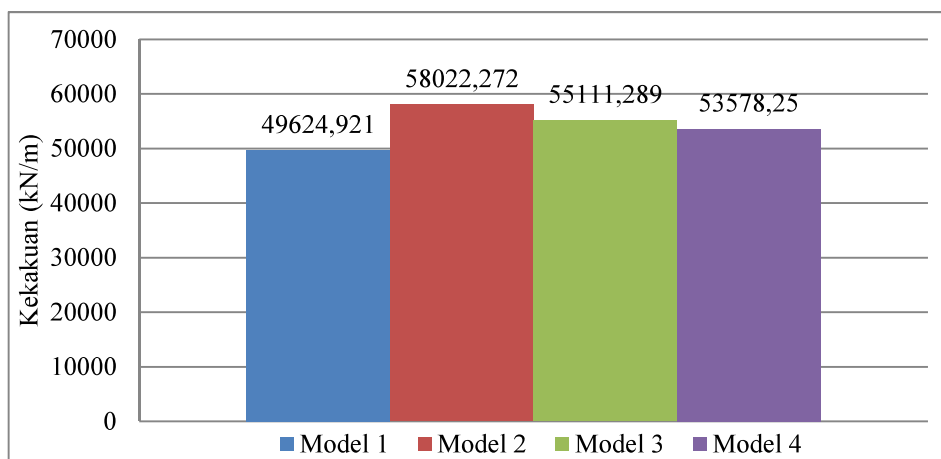
Pada model 4 dimana digunakan kolom bujur sangkar menunjukkan nilai daktilitas pada arah x sebesar 3,313 dan daktilitas pada arah y sebesar 2,783, hal ini karena penampang kolom di kedua arah memiliki inersia yang sama sebesar $62337667500,00 \text{ mm}^4$ sehingga nilai daktilitas dipengaruhi dari bentang struktur dimana bentang pada arah y memiliki nilai inersia sebesar $1,233 \times 10^{17} \text{ mm}^4$ sehingga pada arah tersebut kurang kaku dan lebih mampu dalam mengalami deformasi daripada arah sebaliknya yaitu pada arah x yang memiliki nilai inersia sebesar $2,139 \times 10^{17} \text{ mm}^4$ yang lebih besar dan lebih kaku daripada arah sebaliknya sehingga lebih mampu dalam menahan deformasi dan simpangan.

Pada model 3 dimana penempatan kolom persegi panjang dikombinasikan memanjang arah y untuk bentang yang memanjang arah x dan penempatan kolom memanjang arah x untuk bentang yang memanjang arah y, menunjukkan nilai daktilitas pada arah x sebesar 3,453 dan pada arah y sebesar 2,907, Kedua nilai tersebut berada di rentang antara nilai daktilitas maksimal dan minimal pada arah yang ditinjau, artinya pada model 3 mampu memberikan nilai daktilitas yang lebih baik pada kedua arah dibandingkan dengan model lain yang besar di arah tertentu namun kecil di arah sebaliknya. Hal ini terjadi karena bagian memanjang pada penampang kolom persegi panjang yang memiliki inersia sebesar $89766241200,00 \text{ mm}^4$ yang lebih besar daripada penampang arah sebaliknya sebesar $43290046875,00 \text{ mm}^4$ akan memberikan kekakuan yang besar dan mampu menahan deformasi lateral, ditempatkan memanjang pada bentang struktur yang pendek dimana memiliki inersia sebesar $1,233 \times 10^{17} \text{ mm}^4$ yang lebih kecil daripada bentang arah sebaliknya sebesar $2,139 \times 10^{17} \text{ mm}^4$ dan kurang kaku sehingga lebih mampu mengalami deformasi lateral yang besar. Berdasarkan nilai daktilitas tersebut, maka penempatan kolom persegi panjang secara kombinasi dianjurkan terhadap gedung dengan denah L tanpa dilatasi.

Selanjutnya dapat dibandingkan nilai kekakuan dari semua model yang ditinjau pada arah x dan arah y yang dapat dilihat pada Gambar 5.100 dan Gambar 5.101 berikut.



Gambar 5.100 Perbandingan Kekakuan Semua Model Pada Arah X



Gambar 5.101 Perbandingan Kekakuan Semua Model Pada Arah Y

Berdasarkan Gambar 5.100 dapat disimpulkan model yang memiliki nilai kekakuan paling besar pada arah x dibandingkan dengan model yang lainnya adalah model 1 dimana pada model tersebut menggunakan kolom persegi panjang ditempatkan memanjang arah x sumbu global bangunan x dengan nilai kekakuan 67150,625 kN/m. Berdasarkan Gambar 5.101 dapat disimpulkan model yang memiliki nilai kekakuan paling besar pada arah y dibandingkan dengan model yang lainnya adalah model 2 dimana pada model tersebut menggunakan kolom persegi panjang ditempatkan memanjang arah y sumbu global bangunan. Hal tersebut terjadi karena bagian memanjang pada penampang kolom memiliki nilai inersia sebesar $89766241200,00 \text{ mm}^4$ yang lebih besar daripada bentang arah

sebaliknya sebesar 43290046875,00 mm⁴ dalam hal ini penempatan kolom pada model 1 memanjang arah x sumbu global dan pada model 2 memanjang arah y akan memberikan nilai kekakuan yang besar pada arah tersebut, namun pada arah sebaliknya dimana pada model 1 arah y dan pada model 2 arah x memberikan nilai kekakuan yang kecil dibuktikan pada Gambar 5.108 model yang memiliki nilai kekakuan paling kecil pada arah x adalah model 2 dengan nilai kekakuan 56079,034 kN/m dan pada Gambar 5.109 model yang memiliki nilai kekakuan paling kecil pada arah y adalah model 1 dengan nilai kekakuan 49624,921 kN/m.

Pada model 4 dimana digunakan kolom bujur sangkar menunjukkan nilai kekakuan pada arah x sebesar 62162,7 kN/m lebih besar daripada kekakuan arah y sebesar 53578,3 kN/m, hal ini karena penampang kolom di kedua arah memiliki inersia yang sama sehingga nilai kekakuan dipengaruhi dari bentang struktur dan konfigurasi balok dimana bentang struktur memanjang pada arah x yang memiliki nilai inersia sebesar $2,139 \times 10^{17}$ mm⁴ dan konfigurasi balok anak yang ditempatkan memanjang arah pada x sumbu global.

Rosyidah dan Sucita (2010) telah melakukan penelitian tentang pengaruh konfigurasi penempatan balok anak terhadap perilaku struktur beton bertulang, penelitian dilakukan untuk meninjau periode getar dan simpangan pada empat model dengan denah beraturan menggunakan variasi konfigurasi balok anak yang dikaji antara lain model 1 konfigurasi balok anak searah sumbu x, model 2 konfigurasi balok anak searah sumbu y, model 3 konfigurasi balok anak tiap lantai berbeda arah sumbu, serta model 4 konfigurasi balok anak bersilangan. Hasil dari penelitian tersebut adalah struktur dengan konfigurasi balok anak searah sumbu x memiliki simpangan struktur arah x paling kecil dibandingkan dengan konfigurasi balok pada model lain, serta struktur dengan konfigurasi balok anak searah sumbu y memiliki simpangan struktur arah y paling kecil dibandingkan dengan konfigurasi balok pada model lain. Artinya kekakuan struktur dalam menahan simpangan dipengaruhi oleh konfigurasi penempatan balok anak, dimana ketika balok anak ditempatkan memanjang pada arah tertentu membuat struktur lebih mampu menahan simpangan dan lebih kaku pada arah tersebut.

Pada model 3 dimana penempatan kolom persegi panjang dikombinasikan memanjang arah y untuk bentang yang memanjang arah x dan penempatan kolom memanjang arah x untuk bentang yang memanjang arah y, menunjukkan kekakuan yang lebih baik pada kedua arah dengan nilai kekakuan pada arah x sebesar 59090,788 kN/m dan nilai kekakuan pada arah y sebesar 55111,289 kN/m, artinya tidak besar di satu arah tetapi juga tidak kecil di arah lainnya. Hal ini terjadi karena bagian memanjang pada penampang kolom persegi panjang yang memiliki inersia besar akan memberikan kekakuan yang besar, ditempatkan memanjang pada bentang struktur yang pendek dimana memiliki inersia yang kecil dan kurang kaku sehingga kekakuan dapat lebih baik di kedua arah. Berdasarkan tinjauan nilai kekakuan tersebut, maka penempatan kolom persegi panjang secara kombinasi dianjurkan terhadap gedung dengan denah L tanpa dilatasi sesuai dengan anjuran yang didasarkan pada nilai daktilitas struktur.