

BAB V

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 ANALISIS STRUKTUR LINIER

5.1.1 Penentuan Ukuran Balok dan Kolom

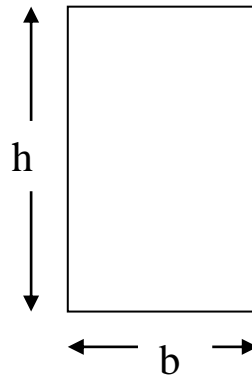
Sebelum menentukan parameter balok dan kolom berupa ukuran, terlebih dahulu mengetahui bentuk denah dari bangunan yang diteliti. Denah dan model bangunan terlihat pada Gambar 5.1.

Denah dalam gambar adalah denah dari bangunan gedung dengan kolom seragam dan gedung dengan variasi kolom setiap 2 tingkatnya. Adapun perhitungan atau estimasi ukuran balok dan kolom pada ke dua bangunan gedung tersebut.

Syarat yang digunakan adalah :

1. SNI 03-2847-2002, Pasal 23.3.1).(4) hal 208 : lebar tidak boleh kurang dari 250 mm dan
2. SNI 03-2847-2002, Pasal 23.3.1).(3) hal 208 : Perbandingan lebar terhadap tinggi tidak boleh kurang dari 0,3. Artinya tinggi maksimum adalah 3,33 kali lebar.

Balok dianalisis menggunakan standar-standar tersebut dengan ukuran tampang sama sebagaimana pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 Penampang balok

Perhitungan balok B1 pada kedua gedung :

Panjang bentang arah y (L) = 6000 mm

Panjang bentang arah x (L) = 6000 mm

$$h = (1/10) \times L \rightarrow (1/14) \times L$$

$$h = (1/12) \times 6000 \text{ mm} = 500 \text{ mm}$$

dipakai $h = 400 \text{ mm}$

$$b = \frac{h}{2} = \frac{500}{2} = 250 \text{ mm}$$

Perhitungan balok Ba1 pada kedua gedung :

Panjang bentang arah y (L) = 6000 mm

Panjang bentang arah x (L) = 6000 mm

$$h = (1/16) \times 6000 \text{ mm} = 375 \text{ mm} \approx 400 \text{ mm}$$

didapatkan $h = 400 \text{ mm}$, tapi dipakai $h = 300 \text{ mm}$

$$b = \frac{h}{2} = \frac{400}{2} = 200 \text{ mm}$$

Perhitungan kolom dilakukan dengan cara konvensional, kolom dalam kedua gedung didesain dengan bentuk persegi. Adapun perhitungan atau estimasi ukuran kolom pada kedua gedung.

Umumnya beban kolom diasumsikan sekitar $1,0 - 2,0 \text{ t/m}^2$. Misal dipakai beban sebesar $2,0 \text{ t/m}^2$. Luas pelat lantai = $6 \times 6 = 36 \text{ m}^2$. Gaya aksial 1 lantai = Luas x beban = $36 \times 2,0 = 72 \text{ ton}$.

$$P_u = \text{Gaya Aksial 1 Lantai} \times n \text{ Lantai}$$

$$= 72 \times 4$$

$$= 288 \text{ ton}$$

$$A_g = \frac{P_u}{0,7 f'_c}$$

$$= \frac{2823552,015}{0,7 \times 25}$$

$$= 161345,8294 \text{ mm}^2$$

$$h = b = \sqrt{A_g}$$

$$= \sqrt{161345,8294}$$

$$h = b = 401,6788 \text{ mm} \rightarrow 600 \text{ mm}$$

Perhitungan di atas adalah untuk gedung dengan kolom seragam. Dari perhitungan di atas didapatkan lebar kolom (b) sebesar 600 mm dan tinggi kolom (h) sebesar 600 mm. Di bawah adalah perhitungan ukuran kolom pada gedung kedua.

Beban kolom diasumsikan sekitar $1,0 - 2,0 \text{ t/m}^2$. Misal dipakai beban sebesar $2,0 \text{ t/m}^2$. Luas pelat lantai = $6 \times 6 = 36 \text{ m}^2$. Gaya aksial 1 lantai = Luas x beban = $36 \times 2,0 = 72 \text{ ton}$.

Ukuran kolom pada tingkat 1 dan 2 :

$$P_u = \text{Gaya Aksial 1 Lantai} \times n \text{Lantai}$$

$$= 72 \times 4$$

$$= 288 \text{ ton}$$

$$A_g = \frac{P_u}{0,7 f'_c}$$

$$= \frac{2823552,015}{0,7 \times 25}$$

$$= 161345,8294 \text{ mm}^2$$

$$h = b = \sqrt{A_g}$$

$$= \sqrt{161345,8294}$$

$$h = b = 401,6788 \text{ mm} \rightarrow 600 \text{ mm}$$

Ukuran kolom pada tingkat 3 dan 4 :

$$P_u = \text{Gaya Aksial 1 Lantai} \times n\text{Lantai}$$

$$= 72 \times 2$$

$$= 144 \text{ ton}$$

$$A_g = \frac{P_u}{0,7 f'_c}$$

$$= \frac{1411776,007}{0,7 \times 25}$$

$$= 80672,9147 \text{ mm}^2$$

$$h = b = \sqrt{A_g}$$

$$= \sqrt{80672,9147}$$

$$h = b = 284,0298 \text{ mm} \rightarrow 400 \text{ mm}$$

Dari perhitungan di atas didapatkan lebar kolom (b) sebesar 400 mm dan tinggi kolom (h) sebesar 400 mm.

5.1.2 Pembebanan

Pembebanan terdiri dari beban mati dan beban hidup bangunan gedung. Beban-beban tersebut terdapat pada beban hidup lantai sebesar $0,25 \text{ t/m}^2$ (beban hidup untuk bangunan hunian/apartemen), beban mati dan beban dinding yang dihitung dalam perhitungan di bawah ini.

Tabel 5.1 Beban lantai

Data	h (m)	Bj (T/m³)	Beban (T/m²)
Pelat	0.12	2.4	0.288
Spesi	0.025	1.9	0.0475
Pasir	0.03	1.8	0.054
Tegel	0.0125		0.0125
Plafon	0.018		0.018
Ducting AC	0.015		0.015
QD lantai			0.4350
QL lantai			0.25
QU lantai			0.922

Tabel 5.2 Beban atap

Data	h (m)	Bj (T/m³)	Beban (T/m²)
Pelat	0.1	2.4	0.24
Spesi	0.025	1.9	0.0475
Lap. Kedap air	0.02	1.9	0.038
Plafon	0.018		0.018
QD atap			0.3435
QL atap			0.1
QU atap			0.5722

5.1.3 Berat Total Bangunan

Berat total bangunan adalah akumulasi seluruh beban mati seperti berat pelat lantai dan atap, balok, kolom, dinding dan lain-lain seluruh lantai dan atap dijumlahkan dengan akumulasi seluruh beban hidup seluruh lantai dan atap. Berat total bangunan ini nantinya akan digunakan untuk mendapatkan beban Gempa, dengan menggunakan rumus perhitungan analisis secara statis.

Tabel 5.3 Berat total bangunan gedung 1

No.	Elemen	Dimensi			BJ	Jumlah	Volume	Berat	
		L	B	H					
(no)	(nama)	(m)	(m)	(m)	(t/m3)	(jumlah)	(m³)	(t)	(kN)
Lantai 1-3									
A	KOLOM								
	Kolom 1	4	0.60	0.60	2.4	35	50.4	120.96	1186.618
B	BALOK								
	B1	6	0.25	0.4	2.4	58	34.8	83.52	819.3312
	Ba1	6	0.2	0.3	2.4	48	17,28	41.4721	406.8403
	Elemen	P	L	Qd	Ql	Jumlah		Berat	
C	PELAT								
	Pelat Lantai	3	3	0.435	0.25	96		4.59	45.0279
D	DINDING								
	Elemen	L	B	H	BJ	Jumlah	Volume	Berat	
	B1	6	0.15	3.48	1.75	58	181.656	158.949	1559.29
TOTAL								409.491	4017.107
BERAT LANTAI 1-3								1228.479	12051.32
Lantai 4 (Atap)									
E	KOLOM								
	Kolom 1	4	0.6	0.6	2.4	35	50.4	120.96	1186.618
F	BALOK								
	B1	6	0.25	0.4	2.4	58	34.8	83.52	819.3312
	Ba1	6	0.2	0.3	2.4	48	17.28	41.4721	406.8403
	Elemen	P	L	Qd	Ql	Jumlah		Berat	
G	PELAT								
	Pelat Atap	3	3	0.3435	0.1	96		3.3615	32.97632
D	DINDING								
	Elemen	L	B	H	BJ	Jumlah	Volume	Berat	
	B1	6	0.15	1.74	1.75	58	90.828	79.4745	779.6448
TOTAL								328.788	3225.41
BERAT LANTAI 4 (Atap)								328.788	3225.41
TOTAL BERAT BANGUNAN								1557.261	15276.73

Tabel 5.4 Berat total bangunan gedung 2

No.	Elemen	Dimensi			BJ	Jumlah	Volume	Berat	
		L	B	H					
(no)	(nama)	(m)	(m)	(m)	(t/m3)	(jumlah)	(m ³)	(t)	(kN)
Lantai 1-2									
A	KOLOM								
	Kolom 1	3.5	0.6	0.6	2.4	35	44.1	105.84	1038.29
B	BALOK								
	B1	6	0.25	0.5	2.4	58	43.5	104.4	1024.164
	Ba1	6	0.2	0.3	2.4	48	17.28	41.472	406.8403
	Elemen	P	L	Qd	Ql	Jumlah		Berat	
C	PELAT								
	Pelat Lantai	3	3	0.4385	0.25	96		6.1965	60.78767
D	DINDING								
	Elemen	L	B	H	BJ	Jumlah	Volume	Berat	
	B1	6	0.15	3.48	1.75	58	181.656	158.949	1559.29
TOTAL								409.491	4017.107
BERAT LANTAI 1-3								818.982	8034.213
Lantai 3									
E	KOLOM								
	Kolom 2	3.5	0.4	0.4	2.4	35	19.6	47.04	461.4624
F	BALOK								
	B1	6	0.25	0.5	2.4	58	43.5	104.4	1024.164
	Ba1	6	0.2	0.3	2.4	48	17.28	41.472	406.8403
	Elemen	P	L	Qd	Ql	Jumlah		Berat	
G	PELAT								
	Pelat Atap	3	3	0.345	0.1	96		4.005	39.28905
D	DINDING								
	Elemen	L	B	H	BJ	Jumlah	Volume	Berat	
	B1	6	0.15	3.48	1.75	58	181.656	158.949	1559.29
TOTAL								342.291	3357.875
BERAT LANTAI 4 (Atap)								342.291	3357.875

Lanjutan **Tabel 5.4** Berat total bangunan gedung dengan kolom variasi

Lantai 4 (Atap)									
E	KOLOM								
	Kolom 2	3.5	0.4	0.4	2.4	35	19.6	47.04	461.4624
F	BALOK								
	B1	6	0.25	0.5	2.4	58	43.5	104.4	1024.164
	Ba1	6	0.2	0.3	2.4	48	17.28	41.472	406.8403
	Elemen	P	L	Qd	Ql	Jumlah		Berat	
G	PELAT								
	Pelat Atap	3	3	0.345	0.1	96		4.005	39.28905
D	DINDING								
	Elemen	L	B	H	BJ	Jumlah	Volume	Berat	
	B1	6	0.15	1.75	1.75	58	90.828	79.4745	779.6448
TOTAL								262.4115	2574.257
TOTAL BERAT BANGUNAN								1423.685	13966.34

5.1.4 Perhitungan Beban Gempa

Ketentuan umum bangunan dalam pengaruh beban gempa pada SNI 1726-2012 bangunan gedung untuk hunian/apartemen masuk dalam kategori risiko II dimana tercantum dalam Pasal 4.1.2 “faktor keutamaan bangunan dan kategori risiko struktur bangunan”. Sedangkan faktor keutamaan gempa (I_e) pada bangunan ini adalah 1,0.

1. Penentuan parameter percepatan gempa (S_s, S_1)

Parameter S_s (percepatan batuan dasar pada periode pendek) dan S_1 (percepatan batuan dasar pada periode 1 detik) untuk wilayah medan dapat dilihat dalam Gambar 3.2 dan Gambar 3.3, yang didapat sebesar 1,0 untuk S_s dan 0,5 untuk S_1 .

2. Penentuan kelas situs (SA-SF)

Perumusan kriteria desain seismik suatu bangunan di permukaan tanah atau penentuan amplifikasi besaran percepatan gempa puncak dari batuan dasar ke permukaan tanah untuk suatu situs, maka situs tersebut harus diklasifikasikan terlebih dahulu. Klasifikasi situs tanah untuk wilayah sidikalang tongging Medan sesuai dengan data yang diberikan proyek masuk kelas situs SD (kelas sedang).

3. Menentukan koefisien koefisien situs dan parameter parameter respon spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko tertarget.

Sebelum menentukan nilai S_{MS} dan S_{M1} nilai F_a dan F_v harus dicari terlebih dahulu dengan melihat Tabel 3.3 dan Tabel 3.4 , untuk penelitian ini didapat $F_a = 1$ dan $F_v = 1$, maka nilai S_{MS} dan S_{M1} dapat didapat dengan menggunakan S_s dan S_1 yang sudah diketahui sebelumnya

$$\begin{aligned} S_{Ms} &= F_a \cdot S_s \\ &= 1 \times 1 \\ &= 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{M1} &= F_v \cdot S_1 \\ &= 1 \times 0,5 \\ &= 0,5 \end{aligned}$$

Langkah selanjutnya adalah mencari nilai S_{DS} dan S_{D1} dengan mengikuti persamaan berikut ini.

$$\begin{aligned} S_{DS} &= 2/3 S_{MS} \\ &= 2/3 \times 1 \\ &= 0,67 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{D1} &= 2/3 S_{M1} \\ &= 2/3 \times 0,5 \\ &= 0,33 \end{aligned}$$

4. Menentukan spektrum respon desain

Nilai spektrum respon percepatan desain (S_a) untuk perioda yang lebih kecil dari T_o dan perioda yang lebih besar dari T_s maka T_o , T_s , dan T harus diketahui terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned} T_0 &= 0,2 \times (S_{D1}/S_{DS}) \\ &= 0,2 (0,33/0,67) \\ &= 0,10 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_s &= (S_{D1}/S_{DS}) \\ &= (0,33/0,67) \\ &= 0,50 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_a &= Ct \times Hn^x \\
 &= 0,047 \times 16^{0,9} \\
 &= 0,565
 \end{aligned}$$

S_a untuk perioda yang lebih kecil dari $T_o = 0,10$ adalah:

$$\begin{aligned}
 Sa &= S_{Ds} (0,4 + 0,6 \frac{T}{T_o}) \\
 &= 0,67 (0,4 + 0,6 (0,58/0,10)) \\
 &= 0,267
 \end{aligned}$$

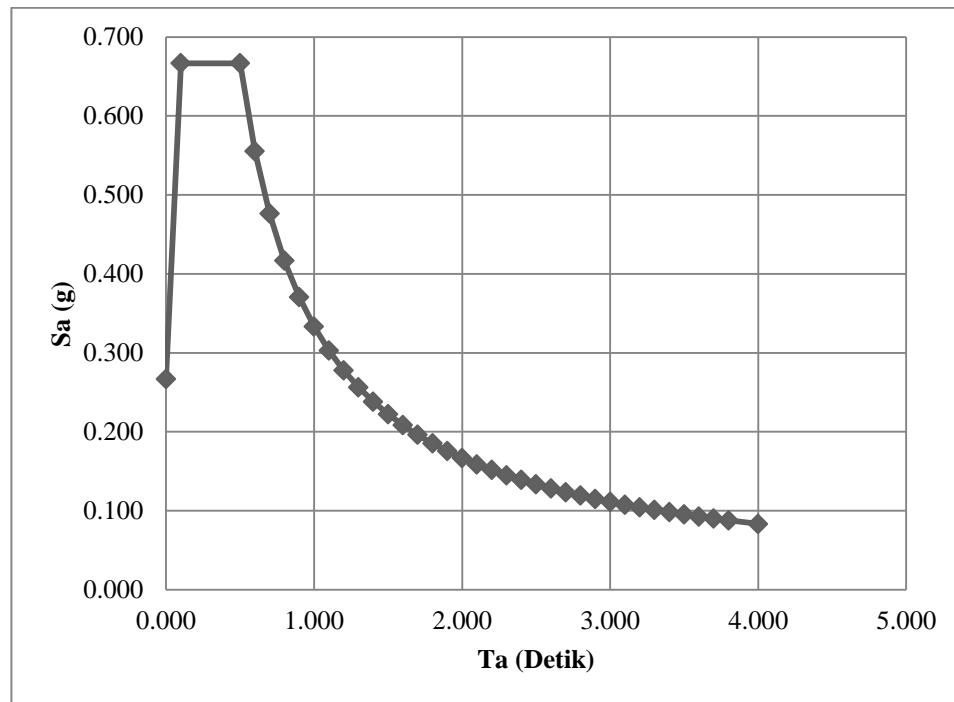
S_a untuk perioda yang lebih besar dari $T_s = 0,50$ adalah:

$$\begin{aligned}
 Sa &= SD1/T \\
 &= 0,33 / 0,58 \\
 &= 0,303
 \end{aligned}$$

Parameter respon spektrum yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 5.5, untuk hasil grafik spektrum respon terdapat pada Gambar 5.2. Diketahui lokasi berada di Yogyakarta dengan tinggi total bangunan 16 meter.

Tabel 5.5 Parameter respon spektrum yang digunakan untuk wilayah Yogyakarta

Ss	1
S1	0,5
Crs	1
Cr1	1
Fa	1
Fv	1
SDS	0,67
SD1	0,33
Ts	0,50
To	0,10
T	0,58
SMS	1
SM1	0,5



Gambar 5.2 Grafik spektrum respon desain

5. Menentukan kategori desain seismik

Bangunan gedung yang diteliti memiliki nilai $S_{DS} = 0,67$ dan $S_{D1} = 0,33$, untuk mengetahui kategori desain seismik, nilai S_{DS} dan S_{D1} harus dibandingkan dengan melihat Tabel 3.7 dan Tabel 3.8. Hasil dari penentuan kategori desain seismik dapat dilihat pada Tabel 5.6

Tabel 5.6 Penentuan kategori desain seismik

Kategori Resiko	II
Faktor Keutamaan	1
S1	0,5
SDS	0,67
SD1	0,33
Kategori desain seismik	D

6. Batasan perioda fundamental struktur

Batasan perioda fundamental struktur dapat dihitung dengan melihat nilai C_t dan x yang didapat dari Tabel 3.10 dengan h_n adalah tinggi struktur bangunan yaitu 16 meter. Maka perioda fundamental pendekatan (T_a) dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

$$\begin{aligned} T_a &= C_t \times h_n^x \\ &= 0,047 \times 16^{0,9} \\ &= 0,565 \text{ detik} \end{aligned}$$

7. Perhitungan geser dasar seismik

Sebelum menghitung geser dasar seismik (V), maka diperlukan untuk menghitung terlebih dahulu koefisien respon seismik C_s dimana:

$$\begin{aligned} C_{s \text{ normal}} &= S_{DS}/(R/I_e) \\ &= 0,667 / (8 / 1,0) \\ &= 0,083 \end{aligned}$$

Nilai R didapatkan dari Tabel 3.11 sebesar 8. Syarat untuk nilai C_s yang dihitung adalah tidak boleh melebihi persamaan berikut:

$$\begin{aligned} C_{s \text{ maks}} &= \frac{SDS}{T/(\frac{R}{I_e})} \\ &= 0,667/0,565 (8/1,0) \\ &= 0,074 \end{aligned}$$

C_s harus tidak kurang dari

$$C_{s \text{ min}} = 0,044 S_{DS} I_e \geq 0,01$$

$$= 0,044 \times 0,667 \times 1,0 \geq 0,01$$

$$= 0,029 \geq 0,01$$

Nilai C_s yang dipakai dalam penelitian ini adalah C_s maksimum karena C_s normal melebihi C_s maksimum. Setelah koefisien yang diperlukan sudah didapat maka nilai geser dasar seismik dapat dicari dengan memperhitungkan berat efektif seismik struktur (W) yang didapat dari perhitungan berat total bangunan.

$$\begin{aligned} V &= C_s W \\ &= 0,074 \times 15819,184 \\ &= 1166,484 \text{ kN} \end{aligned}$$

Maka nilai geser dasar seismik pada penelitian bangunan gedung ini adalah 1166,484 kN.

8. Perhitungan distribusi gaya gempa

Distribusi gaya gempa dapat dihitung setelah faktor distribusi telah didapat, contoh perhitungan distribusi gaya gempa pada lantai 1 adalah sebagai berikut

$$\begin{aligned} C_{vx} &= (w_x h_x^k) / (\sum_{i=1}^n w_i h_i^k) \\ &= (4 \times 423,315) / (1609179,879) \\ &= 4 \% \end{aligned}$$

Parameter perhitungan gaya lateral statik ekuivalen dapat dilihat pada Tabel 5.7 dan perhitungan distribusi gaya lateral statik ekuivalen tiap panel pada Tabel 5.8.

Tabel 5.7 Parameter perhitungan gaya lateral statik ekuivalen

Gaya Lateral Ekuivalen			
Data	Persamaan	Nilai	Satuan
SD_s	-	0.667	-
SD_1	-	0.333	-
$T_a = T$	$T_a = C_t \cdot H_n^x$	0.565	-
C_t	-	0.047	-
H_n	-	16	Meter
X	-	0.900	-
R	Koefisien Modifikasi Respon	8.000	-
I_e	Faktor Keutamaan	1.000	-
C_s Normal	$SD_s / (R/I_e)$	0.083	-
C_s Maximum	$C_s = \frac{S_{D1}}{T \left(\frac{R}{I_e} \right)}$	0.074	-
C_s Minimum	$0.044SD_s \text{ } I_e \geq 0.01$	0.029	-
C_s Digunakan	Digunakan Sesuai Syarat	0.074	-
W	Berat Efektif Seismik Struktur	15276.730	kN
V (Geser Dasar Seismik)	$V = C_s \cdot W$	1126.485	kN
K	Interpolasi Linier ($T=0,5 \text{ } k=1$; $T=2,5 \text{ } k=2$)	1.0424	kN

Tabel 5.8 Perhitungan distribusi gaya lateral statik ekuivalen gedung 1

Lantai	Wi		H (m)	H ^k (m)	W . H ^k (kN.m)	Cvx	Fi
	Ton	kN					Ton
1	409.491	4017.107	4	4.24	17041.22	10%	11.9505
2	409.491	4017.107	8	8.74	35098.97	21%	24.6139
3	409.491	4017.107	12	13.33	53561.40	33%	37.5611
4	328.788	3225.410	16	18.00	58044.31	35%	40.7048
Σ		15819.184	40.000	44.309	1609179.879	100%	114.830

Tabel 5.9 Perhitungan distribusi gaya lateral statik ekuivalen gedung 2

Lantai	Wi		H	H ^k	W . H ^k	Cvx	Fi
	Ton	kN					Ton
1	409.491	4017.107	4	4,24	17041.22	12%	12.4897
2	409.491	4017.107	8	8,74	35098.97	25%	25.7244
3	342.291	3357.875	12	13,33	44771.64	31%	32.8136
4	262.4115	2574.257	16	18,00	45326.19	32%	33.9529
Σ		14508,799	40.000	44,309	149246,888	100%	104.980

5.1.5 Redistribusi Momen Balok

Momen-momen pada balok didapatkan dari hasil analisis SAP2000 v.14 yang berupa *moment* 3-3.

Syarat:

$$M_{\text{pakai}}^{-} \geq 50 \% M_{\text{pakai}}^{+}$$

M^{-} = Digunakan untuk perhitungan tulangan Tumpuan

M_{pakai}^{+} = Digunakan untuk perhitungan tulangan Lapangan

Sebagian balok hanya membutuhkan tulangan sebelah saja . Tetapi pada ketentuan pekerjaan bangunan tingkat tinggi , tulangan harus sepenuhnya Rangkap.

Table 5.10 Momen desain pada gedung 1

BALOK	LANTAI	M- (KNm)	M+ (KNm)
B1	L1	137.168	84.3458
B1	L2	136.554	83.0553
B1	L3	136.2142	82.7812
B1	L4	90.865	60.9123
Ba1	L1	42.9752	24.3015
Ba1	L2	42.7144	24.1182
Ba1	L3	42.5403	24.0936
Ba1	L4	28.7015	23.3687

Table 5.11 Momen desain pada gedung 2

BALOK	LANTAI	M- (KNm)	M+ (KNm)
B1	L1	139.4159	84.9223
B1	L2	137.96	84.5202
B1	L3	137.0013	79.9972
B1	L4	87.4288	62.8236
Ba1	L1	42.1576	28.004
Ba1	L2	41.8927	28.1482
Ba1	L3	41.7222	27.6903
Ba1	L4	28.359	23.2004

5.1.6 Desain Tulangan Balok

1. Ketentuan

Tegangan desak beton, f'_c	= 25 MPa
Tegangan leleh baja, f_y	= 400 MPa
Modulus elastisitas baja tulangan, E_s	= 200000 MPa
Regangan maks serat desak beton, ϵ_{cu}	= 0,003
Tulangan pokok D	= 22 mm
Selimut beton Pb	= 40 mm
Tulangan sengkang P	= 10 mm

2. Desain tulangan lentur balok

A. Menghitung tulangan tumpuan balok

$$A_{1D} = 0,25 \times \pi \times D^2 = 0,25 \times \pi \times 22^2 = 380,13 \text{ mm}^2$$

$$d_s = p_b + \phi_s + \phi_p + (0,5 \phi_p) = 40 + 10 + 22 + (0,5 \times 22) = 83 \text{ mm}$$

$$d' = p_b + \phi_s + (0,5 \phi_p) = 40 + 10 + (0,5 \times 22) = 61 \text{ mm}$$

$$f'_c = 25 \text{ MPa} \leq 30 \text{ maka } \beta_1 = 0,85$$

$$f_y = 400 \text{ MPa}$$

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

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{400}{200000} = 0,002$$

$$\begin{aligned} \text{Nilai Rasio Tulangan} \rightarrow \rho_b &= \frac{0,85 \times f'_c}{f_y} \times \beta \times \left[\frac{600}{600 + f_y} \right] \\ &= \frac{0,85 \times 25}{400} \times 0,85 \times \left[\frac{600}{600 + 400} \right] = 0,02709 \end{aligned}$$

$$\rho_{maks} = 0,75 \times \rho_b = 0,75 \times 0,02709 = 0,02032$$

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{400} = 0,0035$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \times f'_c} = \frac{400}{0,85 \times 25} = 18,8235$$

$$\begin{aligned} R_n &= \rho \times f_y \times (1 - 0,5 \times \rho \times m) \\ &= 0,0183 \times 400 \times (1 - 0,5 \times 0,02709 \times 18,8235) = 6,5736 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$M_u = 137,168 \text{ kNm} \rightarrow \frac{M_u}{0,8} = 171,4600 \text{ kNm}$$

$$bd^2 = \frac{M_n}{R_n} = \frac{171,4600 \times 10^6}{6,5736} = 26,083036 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$\text{Mencari nilai d kebutuhan tulangan rangkap } d = \sqrt{\frac{bd^2}{b}}$$

$$b = 250 \text{ mm} \rightarrow d = \sqrt{\frac{26,083036 \times 10^6}{250}} = 323,0049 \text{ mm}$$

$$d = h - d_s = 400 - 83 = 317 \text{ mm}$$

$$d = 317 \text{ mm} < 323,0049 \text{ mm} \rightarrow \text{Dipakai tulangan rangkap}$$

$$\text{Dipakai } b = 250 \text{ mm}, d = 317 \text{ mm}, h = 400 \text{ mm}$$

$$\text{Balok tulangan rangkap, diambil } \rho = \rho_{maks} = 0,02032$$

$$A_{s1} = A_s - A_{s'}$$

$$A_{s1} = \rho \times b \times d_{ada} = 0,02032 \times 250 \times 317 = 1610,3848 \text{ mm}^2$$

$$a = \frac{A_{s1} \times f_y}{0,85 \times f'_c \times b} = \frac{1610,3848 \times 400}{0,85 \times 25 \times 250} = 121,2525 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} M_{n1} &= A_{s1} \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2} \right) \\ &= 1610,3848 \times 400 \times \left(317 - \frac{121,2525}{2} \right) = 123,7968 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$M_{n1} < \frac{M_u}{\phi} = 171,4600 \text{ kNm}$$

$$M_{n2} = \frac{M_u}{\phi} - M_{n1} = 171,4600 - 123,7968 = 47,6631 \text{ kNm}$$

$$\text{Luas Tulangan Desak (} A_{s'} \text{)}$$

$$As' = As_2$$

$$fs' = 600 \times \left[1 - \frac{0,85 \times f'c \times \beta \times d'}{(\rho - \rho') \times fy \times d} \right]$$

$$= 600 \times \left[1 - \frac{0,85 \times 25 \times 0,85 \times 61}{(0,02032) \times 400 \times 317} \right] = 343,4280 \text{ MPa}$$

$$fs' < fy, \text{ maka } fs' = 343,4280 \text{ MPa}$$

Atau dengan memeriksa regangan tulangan desak

$$c = \frac{a}{\beta} = \frac{121,2525}{0,85} = 142,65 \text{ mm}$$

$$\epsilon_s' = \frac{c-d'}{c} \epsilon_{cv} = \frac{142,65-61}{142,65} 0,003 = 0,001717 < \epsilon_y = 0,002$$

→ Baja desak belum leleh

$$\text{Maka } f's = 343,4280 \text{ MPa}$$

$$As' = \frac{Mn_2}{fs' \times (d-d')} = \frac{47,6631 \times 10^6}{343,4280 \times (317-61)} = 542,1345 \text{ mm}^2$$

$$\diamond \text{ Dipakai tulangan } \phi 22 \rightarrow A_1\phi = 380,13 \text{ mm}^2$$

Jumlah Tulangan Desak

$$n' = \frac{As'}{A_1\phi} = \frac{542,1345}{380,13} = 1,4262 \approx 2 \text{ buah}$$

$$As'_{ada} = n \times A_1\phi = 2 \times 380,13 = 760,2654 \text{ mm}^2$$

Jumlah Tulangan Tarik

$$As = As_1 + As_2 = 1610,3877 + 542,1345 = 2152,5193 \text{ mm}^2$$

$$n = \frac{As}{A_1\phi} = \frac{2152,5193}{380,13} = 5,6625 \approx 6$$

$$As_{ada} = n \times A_1\phi = 6 \times 380,13 = 2280,7963 \text{ mm}^2$$

$$\text{Syarat } n_{desak} \geq 50\% n_{tarik}$$

Jadi Jumlah Tulangan Desak

$$n' = 3$$

$$As'_{ada} = n \times A_1\phi = 3 \times 380,13 = 1140,3981 \text{ mm}^2$$

Jumlah Tulangan Maksimal 1 baris

$$m_{maks} = \frac{b-2 \times (Pb+\phi_s) + \phi_p}{2 \times \phi_p} = \frac{250-2 \times (40+10)+22}{2 \times 22} = 3,91 \approx 3$$

$$\text{Jarak} = \frac{b-2 \times (Pb+\phi_s) - n_{1baris} \times \phi_p}{n_{1baris} - 1} = \frac{250-2 \times (40+10)-3 \times 22}{4-1} = 42 \text{ mm} > 20 \text{ mm ok}$$

3. Menghitung Momen Kapasitas (Mp)

Momen Kapasitas Negatif $M_{pr}^{(-)}$

Desain tulangan balok pada Tumpuan

Tarik = 6 D22

$$A_{s_{ada}} = n \times A_1 \phi = 6 \times 380,13 = 2280,7963 \text{ mm}^2$$

Desak = 3 D22

$$A_{s'_{ada}} = n \times A_1 \phi = 3 \times 380,13 = 1140,3981 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} C_c &= 0,85 \times f'_c \times a \times b \\ &= 0,85 \times 25 \times (0,85 \times c) \times 250 \\ &= 4515,625 \text{ c} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_s &= A_{s'_{ada}} \times \frac{c-d'}{c} \times 600 \\ &= 1140,3981 \times \frac{c-d'}{c} \times 600 \\ &= 684238,88 \frac{c-d'}{c} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T &= 1,25 \times A_{s_{ada}} \times f_y \\ &= 1,25 \times 2280,7963 \times 343,428 \\ &= 1140398,133 \end{aligned}$$

$$C_c + C_s - T_s = 0$$

$$4515,625 \text{ c} + 684238,88 \frac{c-d'}{c} - 1140398,133 = 0$$

$$4515,625 \text{ c}^2 - 456159 \text{ c} - 41738571,68 = 0$$

$$1 \text{ c}^2 - 101,018 \text{ c} - 9243,1439 = 0$$

$$c = 159,1105 \text{ mm}$$

$$a = 0,85 \times c = 0,85 \times 159,110 = 135,2440 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} f_s' &= \frac{c-d'}{c} \times 600 \\ &= \frac{159,1105 - 61}{159,1105} \times 600 \\ &= 369,9713 \text{ MPa} < f_y = 400 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$f_{s'_{pakai}} = f_s' = 369,9713 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned}
M_{pr}^{(-)} &= \left\{ 0,85 \times f'c \times a \times b \times \left(d - \frac{a}{2} \right) \right\} + \{ As'_{ada} \times fs' \times (d - d') \} \\
&= \left\{ 0,85 \times 25 \times 135,2440 \times 250 \times \left(317 - \frac{135,2440}{2} \right) \right\} + \\
&\quad \{ 1140,3981 \times 369,9713 \times (317 - 61) \} \\
&= 287,1841 \text{ kNm} \\
\frac{M_{pr}^{-}}{M_n^{-}} &= \frac{287,1841}{171,46} = 1,6749
\end{aligned}$$

Momen Kapasitas Positif $M_{pr}^{(+)}$

Desain tulangan balok pada Tumpuan

Desak = 6 D22

$$As'_{ada} = n \times A_1 \phi = 6 \times 380,13 = 2280,7963 \text{ mm}^2$$

Tarik = 3 D22

$$As_{ada} = n \times A_1 \phi = 3 \times 380,13 = 1140,3981 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned}
Cc &= 0,85 \times f'c \times a \times b \\
&= 0,85 \times 25 \times (0,85 \times c) \times 250 \\
&= 4515,625 \text{ c}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Cs &= As'_{ada} \times \frac{c-d'}{c} \times 600 \\
&= 2280,7963 \times \frac{c-d'}{c} \times 600 \\
&= 684238,88 \frac{c-d'}{c}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T &= 1,25 \times As_{ada} \times fy \\
&= 1,25 \times 1140,3981 \times 400 \\
&= 1140398,133
\end{aligned}$$

$$Cc + Cs - Ts = 0$$

$$\begin{aligned}
4515,625 \text{ c} + 684238,88 \frac{c-d'}{c} - 1140398,133 &= 0 \\
4515,625 \text{ c}^2 - 456159 \text{ c} - 56791827 &= 0 \\
1 \text{ c}^2 - 101,018 \text{ c} - 12576,7368 &= 0
\end{aligned}$$

$$c = 173,5045 \text{ mm}$$

$$a = 0,85 \times c = 0,85 \times 173,5045 = 147,4788 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
 f_s' &= \frac{c-d'}{c} \times 600 \\
 &= \frac{173,5045 - 83}{173,5045} \times 600 \\
 &= 312,9757 \text{ MPa} < f_y = 400 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$f_{s' \text{ pakai}} = f_s' = 312,9757 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned}
 M_{pr}^{(+)} &= \left\{ 0,85 \times f'_c \times a \times b \times \left(d - \frac{a}{2} \right) \right\} + \{ A_s'_{\text{ada}} \times f_s' \times (d - d') \} \\
 &= \left\{ 0,85 \times 25 \times 312,9757 \times 250 \times \left(339 - \frac{147,4788}{2} \right) \right\} + \\
 &\quad \{ 2280,7963 \times 312,9757 \times (339 - 83) \} \\
 &= 274,1087 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

$$\frac{M_{pr}^{+}}{M_n^{+}} = \frac{274,1087}{105,4322} = 2,5998$$

B. Menghitung tulangan lapangan balok

$$A_{1D} = 0,25 \times \pi \times D^2 = 0,25 \times \pi \times 22^2 = 380,13 \text{ mm}^2$$

$$d' = p_b + \phi_s + \phi_p + (0,5\phi_p) = 40 + 10 + 22 + (0,5 \cdot 22) = 83 \text{ mm}^2$$

$$d_s = p_b + \phi_s + (0,5\phi_p) = 40 + 10 + (0,5 \cdot 22) = 61 \text{ mm}^2$$

$$f'_c = 25 \text{ MPa}, \text{ Maka } \beta_1 = 0,85$$

$$f_y = 400 \text{ MPa}$$

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

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{400}{200000} = 0,002$$

$$\begin{aligned}
 \text{Nilai Rasio Tulangan } (\rho_b) &= \frac{0,85 \times f'_c}{f_y} \times \beta \times \left[\frac{600}{600 + f_y} \right] \\
 &= \frac{0,85 \times 25}{400} \times 0,85 \times \left[\frac{600}{600 + 400} \right] \\
 &= 0,027093
 \end{aligned}$$

$$\rho_{\text{maks}} = 0,75 \times \rho_b = 0,75 \times 0,027093 = 0,02032$$

$$\rho_{\text{min}} = \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{400} = 0,0035$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 \times f'_c} = \frac{400}{0,85 \times 25} = 18,8235$$

$$\begin{aligned}
 R_n &= \rho \times f_y \times (1 - 0,5 \times \rho \times m) \\
 &= 0,02032 \times 400 \times (1 - 0,5 \times 0,02032 \times 18,8235) \\
 &= 6,5736 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$M_u^+ = 84,3458 \text{ kNm} \longrightarrow \frac{M_u}{\phi} = 105,4322 \text{ kNm}$$

$$bd^2 = \frac{M_n}{R_n} = \frac{105,4322 \times 10^6}{6,5736} = 16038686,82 \text{ mm}^3$$

$$\text{Mencari nilai d kebutuhan tulangan rangkap} \longrightarrow d = \sqrt{\frac{bd^2}{b}}$$

Jika rencana dimensi struktur balok $b = 250 \text{ mm}$, $h = 400 \text{ mm}$

$$b = 250 \text{ mm} \longrightarrow d = \sqrt{\frac{16038686,82}{250}} = 253,2879 \text{ mm}$$

$$d = h - d_s = 400 - 61 = 339 \text{ mm}$$

$$d = 339 \text{ mm} > 253,2879 \text{ mm} \text{ (Dipakai Tulangan sebelah)}$$

$$\text{dipakai } b = 250 \text{ mm}, d = 339 \text{ mm}, h = 5400 \text{ mm}$$

$$\text{balok tulangan rangkap, diambil } \rho = \rho_{\text{maks}} = 0,02032$$

Desain Tulangan Rangkap

$$\text{Dipakai } b = 250 \text{ mm}, h = 400 \text{ mm}$$

$$d = h - d_s = 400 - 61 = 339 \text{ mm}$$

Cek baja desak

$$\begin{aligned}
 f_s' &= 600 \times \left[1 - \frac{0,85 \times f_c' \times \beta \times d'}{(\rho - \rho') \times f_y \times d} \right] \\
 &= 600 \times \left[1 - \frac{0,85 \times 25 \times 0,85 \times 83}{0,02032 \times 400 \times 339} \right] \\
 &= 273,5497 \text{ MPa} < f_y = 400 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

(Baja Belum leleh f_s' pakai = 273,5497 MPa)

$$M_n = M_{n1} + M_{n2}$$

$$M_n = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d_s)$$

$$A_s = A_{s1} + A_{s1}$$

Tentukan terlebih dahulu $A_{s2} = A_s'$

$$A_{\phi 19} = 0,25 \times \pi \times 22^2$$

$$= 380,13 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} A_{s2} &= 3 \times A_{\phi 22} \\ &= 3 \times 380,13 \\ &= 1140,3981 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_s &= A_s' \cdot f_s' \\ &= 1140,3981 \cdot 400 \\ &= 311955,5169 \text{ N} \end{aligned}$$

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} \longrightarrow M_{n1} = M_n - M_{n2}$$

$$\begin{aligned} M_{n2} &= C_s \cdot (d - d') \\ &= 311955,5169 \cdot (339 - 83) \\ &= 79,8606 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{n1} &= M_n - M_{n2} \\ &= 105,4322 - 79,8606 \\ &= 25,5716 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$M_{n1} = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$M_{n1} = 0,85 \cdot f_c' \cdot a \cdot b \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$25,5716 \times 10^6 = 0,85 \cdot 25 \cdot a \cdot 250 \left(339 - \frac{a}{2} \right)$$

$$25571637,7 = 1800938 a - 2656,25 a^2$$

$$2656,25 a^2 - 1800938 a + 25571637,7 = 0$$

$$a = 14,5096 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} a &= \frac{A_{s1} \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot x \cdot b} \longrightarrow A_{s1} = \frac{a \times 0,85 \times f_c' \times x \cdot b}{f_y} \\ &= \frac{14,5096 \times 0,85 \times 25 \times 250}{400} \\ &= 192,7054 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Pakai } \phi_{19} \longrightarrow A_{\phi 19} = 0,25 \times \pi \times 22^2 = 380,13 \text{ mm}^2$$

$$n = \frac{A_{s1}}{A_{1\phi}} = \frac{192,7054}{380,13} = 0,5069 \approx 1 \text{ buah}$$

$$A_{s1} = 1 \times 380,13 = 380,13 \text{ mm}^2$$

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} = 380,13 + 1140,3981 = 1520,5308 \text{ mm}^2$$

$$\text{Jumlah Tulangan Tarik (n)} = \frac{A_s}{A_{1\phi}} = \frac{1520,5308}{380,13} = 4 \text{ buah}$$

Kontrol jarak antar tulangan

$$\begin{aligned} \text{Jarak} &= \frac{b-2(pb+\phi s)-n_{baris} \cdot \phi_{tul}}{n_{baris}-1} \\ &= \frac{250-2(40+10)-4 \cdot 22}{4-1} \\ &= 42 > 22 \text{ mm (Ok)} \end{aligned}$$

Kontrol kapasitas Lentur

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} = \frac{1520,5308}{250 \cdot 339} = 0,01794$$

$$\rho' = \frac{A_s'}{b \cdot d} = \frac{1140,3981}{250 \cdot 339} = 0,01345$$

Baja belum leleh $\longrightarrow f_s' > f_y$ maka $f_s' = f_s' = 273,5497 \text{ MPa}$

$$a = \frac{(A_s - A_s') \cdot f_y}{0,85 \times f_c' \times b} = \frac{(1520,5308 - 1140,3981) \cdot 273,5497}{0,85 \times 25 \times 250} = 28,6218 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} M_n &= \left[(A_s - A_s') f_y \times \left(d - \frac{a}{2} \right) \right] + [A_s' \cdot f_y \times (d - d')] \\ &= \\ &= \left[(1520,5308 - 1140,3981) 273,5497 \times \left(339 - \frac{28,6218}{2} \right) \right] + \\ &= [1140,3981 \cdot 273,5497 \times (339 - 83)] \\ &= 113,6235 \text{ kNm} > M_n = 105,4322 \text{ kNm (Ok)} \end{aligned}$$

Tabel 5.12 Rekap Tulangan Lentur untuk bangunan gedung 1

Nama balok	Tulangan Tumpuan	Tulangan Lapangan	Mkap – (kNm)	Mkap + (kNm)
B1 (Lantai 1)	6D22 3D22	3D22 6D22	287,1841	274,1087
B1 (Lantai 2)	6D22 3D22	3D22 6D22	287,1841	274,1087
B1 (Lantai 3)	6D22 3D22	3D22 6D22	287,1841	274,1087
B1 (Lantai 4)	4D22 3D22	3D22 4D22	202,4013	151,7248
Ba1 (Lantai 1)	4D19 3D19	3D19 4D19	154,7225	116,4392
Ba1 (Lantai 2)	4D19 3D19	3D19 4D19	154,7225	116,4392
Ba1 (Lantai 3)	4D19 3D19	3D19 4D19	154,7225	116,4392
Ba1 (Lantai 4)	4D19 3D19	3D19 4D19	154,7225	116,4392

Tabel 5.13 Rekap Tulangan Lentur untuk bangunan gedung 2

Nama Balok	Tulangan Tumpuan	Tulangan Lapangan	Mkap – (kNm)	Mkap + (kNm)
B1 (Lantai 1)	6D22 3D22	3D22 6D22	287,1841	274,1087
B1 (Lantai 2)	6D22 3D22	3D22 6D22	287,1841	274,1087
B1 (Lantai 3)	6D22 3D22	3D22 6D22	287,1841	274,1087
B1 (Lantai 4)	4D22 3D22	3D22 4D22	202,4013	151,7248
Ba1 (Lantai 1)	4D19 3D19	3D19 4D19	154,7225	116,4392
Ba1 (Lantai 2)	4D19 3D19	3D19 4D19	154,7225	116,4392
Ba1 (Lantai 3)	4D19 3D19	3D19 4D19	154,7225	116,4392
Ba1 (Lantai 4)	4D19 3D19	3D19 4D19	154,7225	116,4392

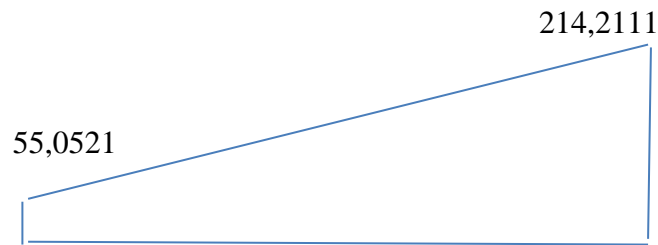
4. Desain tulangan geser balok

$$M_- = 137.168 \text{ kNm}$$

$$M_+ = 84.3458 \text{ kNm}$$

$$L_{\text{netto}} = 5,4 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} V_E &= (M_- + M_+)/L_{\text{netto}} \\ &= (137,168 + 84,3458)/5,4 \\ &= 41,0211 \text{ kNm} \end{aligned}$$



Gambar 5.3 Super posisi Gaya Geser pada balok

Daerah Sendi Plastis

$$V_u = 214,2111 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} V_{s1} &= \frac{V_u}{\phi} - V_c \\ &= \frac{V_u}{0,75} - \left(\frac{1}{6} \times \sqrt{f'_c} \times b \times d \right) \\ &= \frac{214,2111}{0,75} - \left(\frac{1}{6} \times \sqrt{25} \times 250 \times 400 \right) \\ &= 219,5731 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\text{Pakai P10} \rightarrow A_1\phi = \frac{1}{4} \times \pi \times 10^2 = 78,5 \text{ mm}^2$$

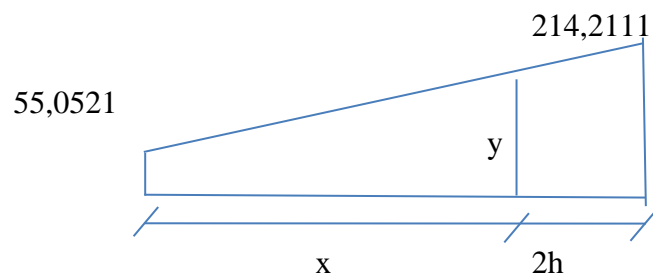
Sengkang 2 kaki

$$s = \frac{\text{kaki} \times A_1\phi \times f_y \times d}{V_{s1}} = \frac{2 \times 78,5 \times 240 \times 400}{219,5731 \times 1000} = 90,7110 \text{ mm}$$

spakai = 90 mm

→ Pakai P10-90 mm

Luar Sendi Plastis



$$2h = 2 \times 0,4 = 0,8 \text{ m}$$

$$x = L - 2h = 6 - 0,8 = 5,2 \text{ m}$$

$$y = \frac{((214,2111 \cdot 6) - ((214,2111 - 55,0521) \cdot (6 - 0,8)))}{6} = 76,2733 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} V_{s1} &= \frac{y}{\phi} - V_c \\ &= \frac{y}{0,75} - \left(\frac{1}{6} \times \sqrt{f'_c} \times b \times d \right) \\ &= \frac{76,2733}{0,75} - \left(\frac{1}{6} \times \sqrt{25} \times 250 \times 400 \right) \\ &= 35,6561 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\text{Pakai P10} \rightarrow A_1 \phi = \frac{1}{4} \times \pi \times 10^2 = 78,5 \text{ mm}^2$$

Sengkang 2 kaki

$$s = \frac{\text{kaki} \times A_1 \phi \times f_y \times d}{V_{s1}} = \frac{2 \times 78,5 \times 240 \times 400}{35,6561 \times 1000} = 558,6059 \text{ mm}$$

spakai = 200 mm

→ Pakai P10-200 mm

Tabel 5.14 Rekap tulangan geser gedung 1 dan gedung 2

Nama balok	Dalam Sendi Plastis	Luar Sendi Plastis
B1 (Lantai 1)	P10-90	P10-200
B1 (Lantai 2)	P10-90	P10-200
B1 (Lantai 3)	P10-90	P10-200
B1 (Lantai 4)	P10-90	P10-200

5.1.7 Desain Tulangan Kolom

1. Diagram Mn-Pn

$$f'_c = 25 \text{ MPa}$$

$$f_y = 400 \text{ MPa}$$

$$\beta_1 = 0,85$$

$$E_s = 2100000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\epsilon_{cu} = 0,003$$

$$\epsilon_y = 0,00194$$

$$\phi_{\text{pokok}} = 2,2 \text{ cm}$$

$$d = 6,1 \text{ cm}$$

$$d' = 6,1 \text{ cm}$$

$$b = 60 \text{ cm}$$

$$h_t = 60 \text{ cm}$$

$$h = 53,9 \text{ cm}$$

$$A_{ID} = 0,25 \times \pi \times 2,2^2 = 3,801 \text{ cm}^2$$

Tiap sisi dipakai tulangan (n) = 4, jumlah tulangan 12D22

$$A_s = n \times A_{ID}$$

$$= 4 \times 3,801$$

$$= 15,21 \text{ cm}^2$$

$$A_s' = A_s = 15,21 \text{ cm}^2$$

Kondisi patah berimbang (*balance*)

$$\begin{aligned} C_b &= \left| \frac{\sum C_u}{\sum C_u + \sum y} \right| h \\ &= \left| \frac{0,003}{0,003 + 0,00194} \right| 60 \\ &= 32,71 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\text{Estimasi } c = 0,9 \times C_b = 0,9 \times 32,71 = 29,44 \text{ cm}$$

$$a = c \times 0,85$$

$$= 29,44 \times 0,85$$

$$= 25,0261$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_s &= \left| \frac{h-c}{c} \right| \varepsilon_c \\ &= \left| \frac{53,9-6,1}{29,44} \right| \cdot 0,003\end{aligned}$$

$$= 0,00249 > \varepsilon_y \text{ (baja tarik sudah leleh)}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_s' &= \left| \frac{c-d'}{c} \right| \varepsilon_c \\ &= \left| \frac{29,44-6,1}{29,44} \right| \cdot 0,003\end{aligned}$$

$$= 0,00238 > \varepsilon_y \text{ (baja desak sudah leleh)}$$

$$f_s \text{ pakai} = 4080 \text{ kg/cm}^2$$

$$\begin{aligned}C_c &= 0,85 \times f'_c \times a \times b \\ &= 0,85 \times 25 \times 25,0261 \times 60 \\ &= 325465 \text{ kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C_s &= A_s' \times (f_s \text{ pakai} - (0,85 \times f'_c)) \\ &= 34,2119 \times (4080 - (0,85 \times 255)) \\ &= 132169 \text{ kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}T_s &= A_s \times f_s \text{ pakai} \\ &= 34,2119 \times 4080 \\ &= 139585 \text{ kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_n &= (C_c + C_s - T_s)/1000 \\ &= (325465 + 132169 - 139585)/1000 \\ &= 318049 \text{ kg} \\ &= 318,049 \text{ t}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_n &= \left[\left(C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \left(C_c \left(\frac{h}{2} - d' \right) \right) + \left(T_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) \right) \right) \right] \\ &= \left[\left(325465 \left(\frac{60}{2} - \frac{0,85 \cdot 29,44}{2} \right) + \left(325465 \left(\frac{60}{2} - 6,1 \right) \right) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left(139585 \left(\frac{60}{2} - 6,1 \right) \right) \right) \right] \\ &= 12186302 \text{ kgcm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 121,8630 \text{ tm} \\
 e &= M_n/P_n \\
 &= 121,8630/318,0492 \\
 &= 0,3832 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Kondisi patah desak ($c' > 1$)

Pada kondisi patah tarik nilai $c < c_b$, maka digunakan factor pengali 0,8.

$$\begin{aligned}
 C &= 1,1 \times C_b \\
 &= 1,1 \times 29,44 \\
 &= 32,384 \text{ cm} \\
 &= 0,3238 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a &= 0,85 \times c \\
 &= 0,85 \times 32,384 \\
 &= 27,526 \text{ cm} \\
 &= 0,2753 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \epsilon_s' &= \left| \frac{c-d'}{c} \right| \epsilon_c \\
 &= \left| \frac{32,384-6,1}{32,384} \right| \cdot 0,003 \\
 &= 0,0024 > \epsilon_y \text{ (baja desak sudah leleh)}
 \end{aligned}$$

$$f_s \text{ desak} = f_y = 400 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned}
 C_c &= (0,85 \times f'_c \times b \times a) \\
 &= (0,85 \times 255 \times 60 \times 27,526) \\
 &= 357981 \text{ kg} \\
 &= 357,981 \text{ t}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_s &= A_s' \times (f_s \text{ pakai} - (0,85 \times f'_c)) \\
 &= 34,2119 \times (4080 - (0,85 \times 255)) \\
 &= 132169 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_s &= A_s \times f_s \text{ pakai} \\
 &= 34,2119 \times 4080 \\
 &= 139585 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_n &= (C_c + C_s - T_s)/1000 \\
&= (357981 + 132169 - 139585) \\
&= 350565 \text{ kg} \\
&= 350,565 \text{ t} \\
M_n &= \left[\left(C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \left(C_c \left(\frac{h}{2} - d' \right) \right) + \left(T_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) \right) \right) \right] \\
&= \left[\left(325465 \left(\frac{60}{2} - \frac{0,85 \cdot 32,384}{2} \right) + \left(325465 \left(\frac{60}{2} - 6,1 \right) \right) + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. \left(139585 \left(\frac{60}{2} - 6,1 \right) \right) \right) \right] \\
&= 16399205 \text{ kgcm} \\
&= 163,9920 \text{ tm} \\
e &= M_n/P_n \\
&= 163,9920/350,565 \\
&= 0,4678 \text{ m}
\end{aligned}$$

Kondisi patah tarik ($c' < 1$)

Pada kondisi patah tarik nilai $c < c_b$, maka digunakan factor pengali 0,8.

$$\begin{aligned}
C &= 0,8 \times C_b \\
&= 0,8 \times 29,44 \\
&= 23,552 \text{ cm} \\
&= 0,2355 \text{ m} \\
a &= 0,85 \times c \\
&= 0,85 \times 23,552 \\
&= 20,019 \text{ cm} \\
&= 0,2002 \text{ m} \\
\varepsilon_s' &= \left| \frac{c-d'}{c} \right| \varepsilon_c \\
&= \left| \frac{20,019-6,1}{20,019} \right| \cdot 0,003 \\
&= 0,0021 > \varepsilon_y \text{ (baja desak sudah leleh)}
\end{aligned}$$

$$f_s \text{ desak} = f_y = 400 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} C_c &= (0,85 \times f'_c \times b \times a) \\ &= (0,85 \times 255 \times 60 \times 20,019) \\ &= 260347 \text{ kg} \\ &= 260,347 \text{ t} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_s &= A_s' \times (f_s \text{ pakai} - (0,85 \times f'_c)) \\ &= 34,2119 \times (4080 - (0,85 \times 255)) \\ &= 132169 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_s &= A_s \cdot f_s \text{ pakai} \\ &= 34,2119 \times 4080 \\ &= 139585 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_n &= (C_c + C_s - T_s)/1000 \\ &= (260347 + 132169 - 139585) \\ &= 252931 \text{ kg} \\ &= 252,931 \text{ t} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_n &= \left[\left(C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{\beta_{1,c}}{2} \right) + \left(C_c \left(\frac{h}{2} - d' \right) \right) + \left(T_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) \right) \right) \right] \\ &= \left[\left(325465 \left(\frac{60}{2} - \frac{0,85 \cdot 23,552}{2} \right) + \left(325465 \left(\frac{60}{2} - 6,1 \right) \right) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left(139585 \left(\frac{60}{2} - 6,1 \right) \right) \right) \right] \\ &= 17620871 \text{ kgcm} \\ &= 176,2067 \text{ tm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e &= M_n/P_n \\ &= 176,2067/252,931 \\ &= 0,6484 \text{ m} \end{aligned}$$

Kondisi $M_n=0$

$$\begin{aligned} P_n &= (0,85 \times f'_c \times b \times h) + ((A_s + A_s') \times (f_y - (0,85 \times f'_c))) \\ &= (0,85 \times 255 \times 60 \times 60) + (15,21 + 15,21) \times (4080 - (0,85 \times 255)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 897783,8 \text{ kg} \\
 &= 897,7838 \text{ t} \\
 \text{Mn} &= 0
 \end{aligned}$$

Kondisi $P_n = 0$

$$A_s = A_s' = 15,21 \text{ cm}^2$$

$$\begin{aligned}
 C_c &= 0,85 \times f'_c \times b \times a \\
 &= 0,85 \times 255 \times 60 \times a \\
 &= 13005 a
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_s &= A_s' \cdot f_y \\
 &= 15,21 \times 4080 \\
 &= 62037,658 \text{ kg} \\
 &= 62,0377 \text{ t}
 \end{aligned}$$

$$C_s = (13005a - 62037,658)/a$$

Keseimbangan gaya horizontal

$$a = 5,0170 \text{ cm} = 0,00502 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}
 c &= a/\beta_1 \\
 &= 5,0170/0,85 \\
 &= 5,9023 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \epsilon_{s'} &= \left| \frac{h-c}{c} \right| \epsilon_c \\
 &= \left| \frac{53,9-5,9023}{5,9023} \right| \cdot 0,003 \\
 &= 0,0244 > \epsilon_y \text{ baja desak sudah leleh}
 \end{aligned}$$

$$F_s \text{ desak} = f_y = 4080 \text{ kg/cm}^2$$

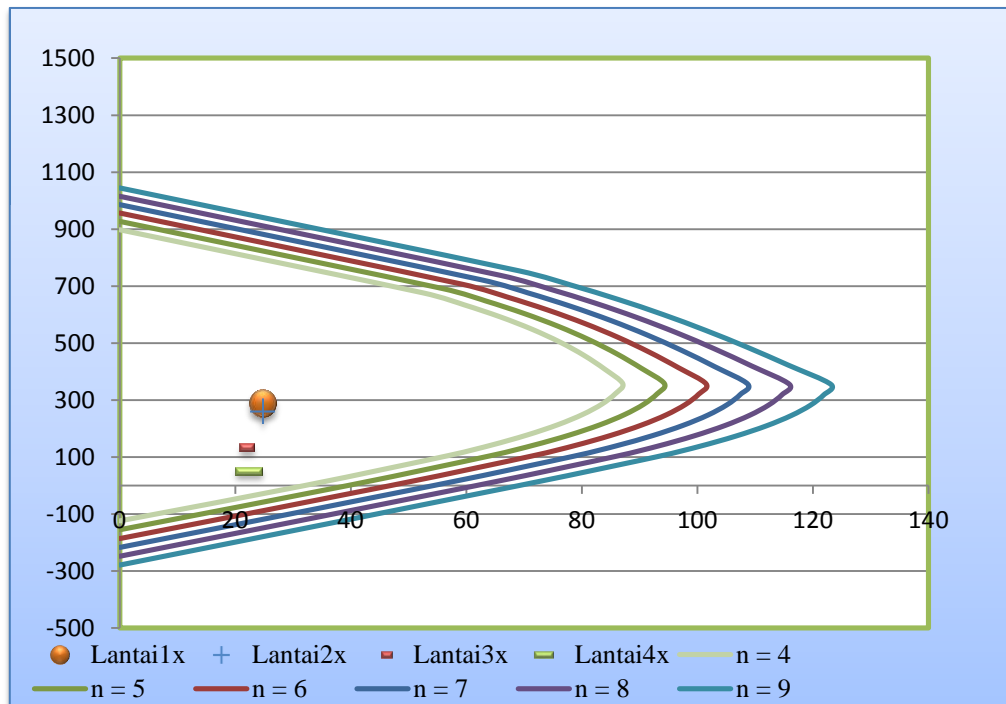
$$\begin{aligned}
 T_s &= A_s \cdot f_s \\
 &= 15,21 \times 4080 \\
 &= 62037,658 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$\text{Mn} = 31,997 \text{ tm}$$

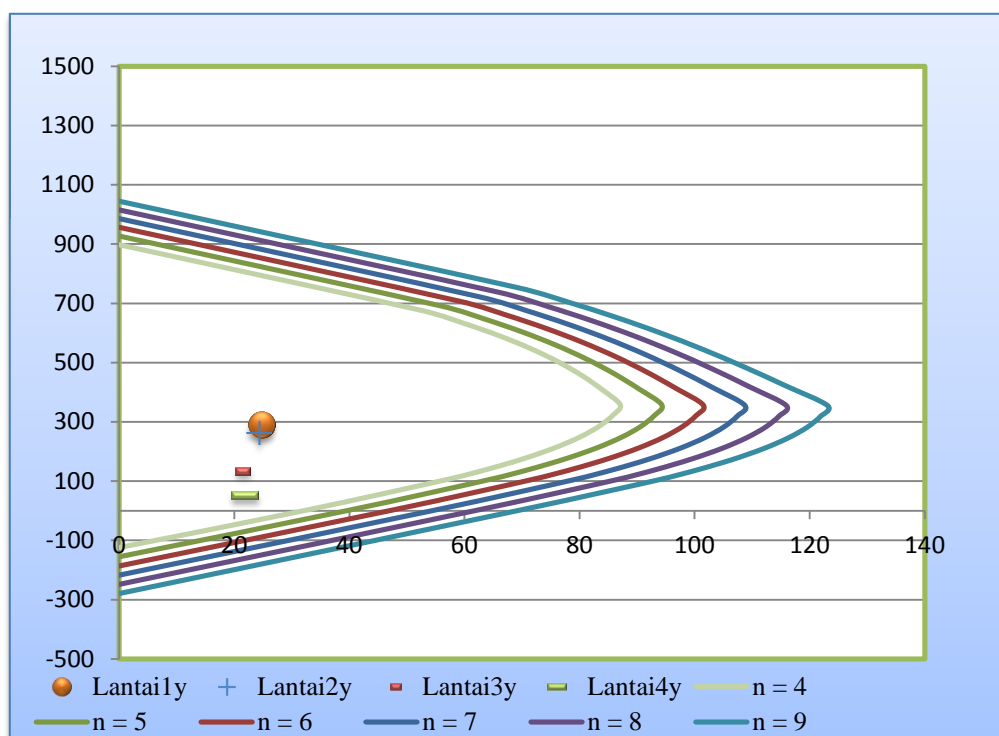
Kondisi tarik murni

$$\begin{aligned}
 P_t &= - \frac{(A_s + A_s') f_y}{1000} \\
 &= - \frac{(15,21 + 15,21) 4080}{1000} \\
 &= -124,075 \text{ tm}
 \end{aligned}$$

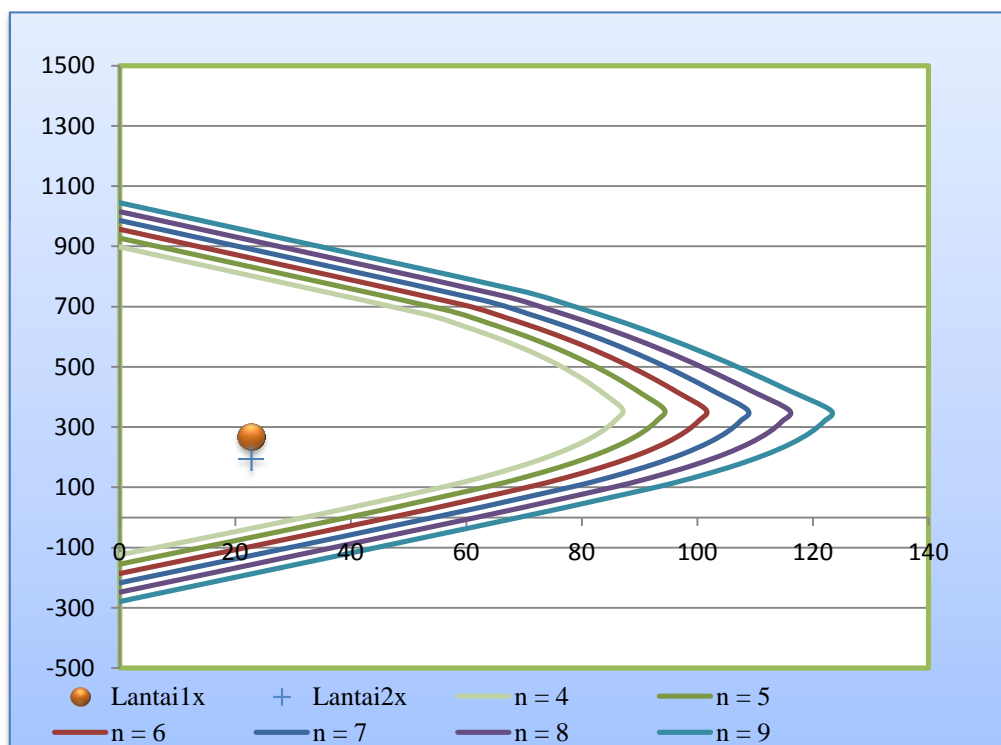
Dari perhitungan Mn Pn didapatkan diagram Mn Pn seperti pada Gambar 5.4 sampai Gambar 5.9. Diagram Mn Pn di bawah ini mewakili diagram Mn Pn untuk gedung 1 dan gedung 2.



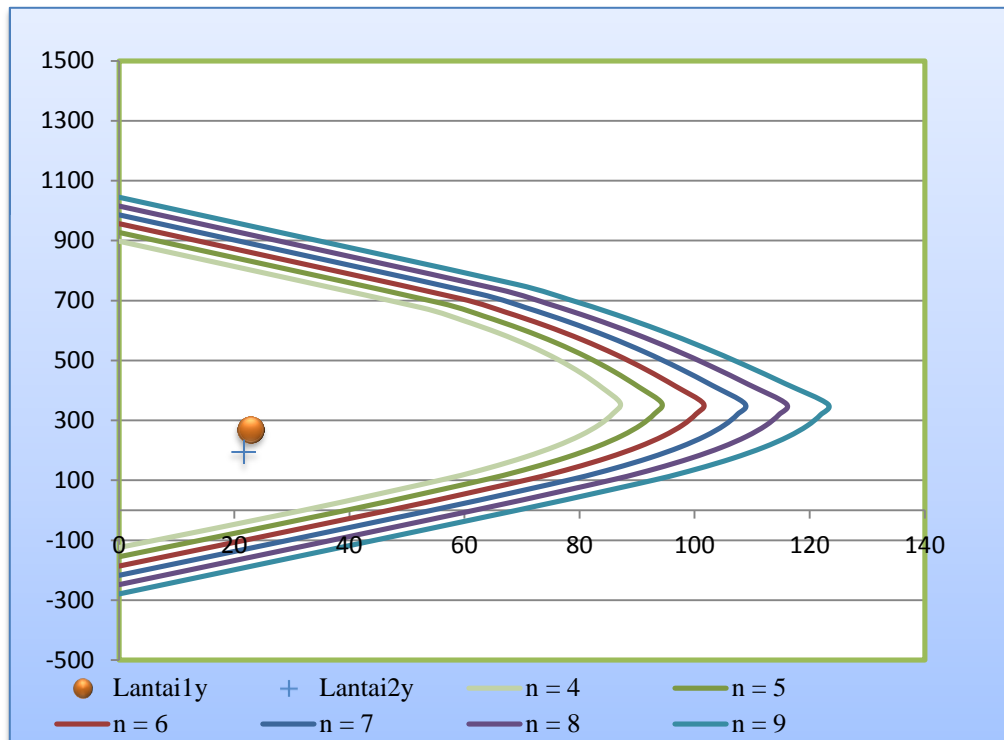
Gambar 5.4 Diagram Mn-Pn arah x untuk gedung 1



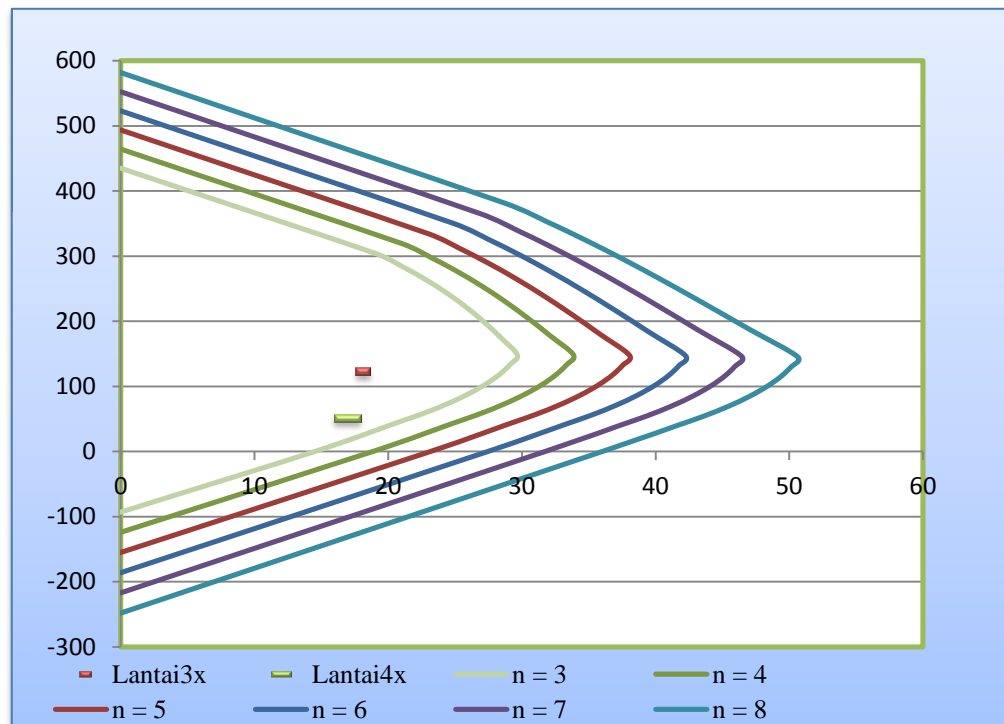
Gambar 5.5 Diagram Mn-Pn arah y untuk gedung 1



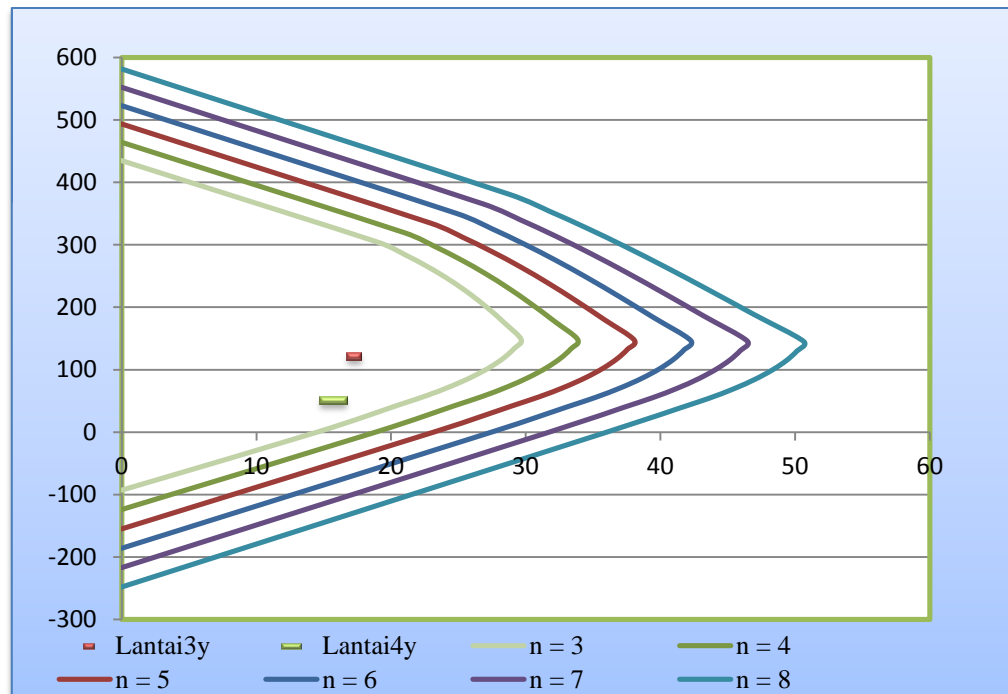
Gambar 5.6 Diagram Mn-Pn arah x untuk gedung 2 pada lantai 1 dan 2



Gambar 5.7 Diagram Mn-Pn arah y untuk gedung 2 pada lantai 1 dan 2



Gambar 5.8 Diagram Mn-Pn arah x untuk gedung 2 pada lantai 3 dan 4



Gambar 5.9 Diagram Mn-Pn arah y untuk gedung 2 pada lantai 3 dan 4

Hasil rekapitulasi dari diagram Mn Pn berupa jumlah tulangan kolom untuk gedung 1 dan gedung 2. Berikut adalah rekapitulasi tulangan kolom yang terdapat pada Tabel 5.15 dan Tabel 5.16.

Tabel 5.15 Rekapitulasi tulangan kolom gedung 1

Lantai	Kolom	Jumlah tulangan		Total	Dimensi (cm)
		Arah X	Arah Y		
1	K1	4D22	4D22	12D22	600 x 600
2		4D22	4D22	12D22	600 x 600
3	K1	4D22	4D22	12D22	600 x 600
4		4D22	4D22	12D22	600 x 600

Tabel 5.16 Rekapitulasi tulangan kolom gedung 2

Lantai	Kolom	Jumlah tulangan		Total	Dimensi (cm)
		Arah X	Arah Y		
1	K1	4D22	4D22	12D22	600 x 600
2		4D22	4D22	12D22	600 x 600
3	K2	3D22	3D22	8D22	400 x 400
4		3D22	3D22	8D22	400 x 400

Dari tabel jumlah tulangan di atas didapatkan nilai rasio tulangan seperti pada Tabel 5.20 dan Tabel 5.21 berikut.

Tabel 5.17 Rasio tulangan pada gedung 1

Lantai	Jumlah Tulangan	Rasio tulangan (%)
1	12D22	1,570
2	12D22	1,570
3	12D22	1,570
4	12D22	1,570

Tabel 5.18 Rasio tulangan pada gedung 2

Lantai	Jumlah Tulangan	Rasio tulangan (%)
1	12D22	1,570
2	12D22	1,570
3	8D22	2,6462
4	8D22	2,6462

2. Desain tulangan geser kolom

$$f'_c = 25 \text{ MPa}$$

$$f_y = 400 \text{ MPa}$$

$$\Phi \text{ sengkang} = 12 \text{ mm}$$

$$L_b \text{ ki} = 6 \text{ m}$$

$$L_b' \text{ ki} = 5,4 \text{ m}$$

$$L_b \text{ ka} = 6 \text{ m}$$

$$Lb' ka = 5,4 \text{ m}$$

$$h1 = 4 \text{ m}$$

$$h1' = 3,8 \text{ m}$$

$$Mpr- ki = 287,1841 \text{ kNm}$$

$$Mpr+ ka = 274,1087 \text{ kNm}$$

$$Me = 1497,7928 \text{ kNm}$$

$$Mkap K1 = (Me \times 1,25) / (0,65 \times 1,6)$$

$$= (1497,7928 \times 1,25) / (0,65 \times 1,6)$$

$$= 1800,2317 \text{ kNm}$$

$$\alpha a = \frac{\frac{1}{h2}}{\frac{1}{h1} + \frac{1}{h2}}$$

$$= \frac{\frac{1}{4}}{\frac{1}{4} + \frac{1}{4}}$$

$$= 0,5$$

$$\alpha b = \frac{\frac{1}{h1}}{\frac{1}{h1} + \frac{1}{h2}}$$

$$= \frac{\frac{1}{4}}{\frac{1}{4} + \frac{1}{4}}$$

$$= 0,5$$

$$Ma = \frac{h1'}{h1} \alpha a \left(\frac{Lb ki}{Lb ki'} (Mpr - ki) + \frac{Lb ka}{Lb ka'} (Mpr + ka) \right)$$

$$= \frac{3,8}{4} 0,5 \left(\frac{6}{5,4} (287,1841) + \frac{6}{5,4} (274,1087) \right)$$

$$= 296,2379 \text{ kNm}$$

$$Mb = \frac{h1'}{h1} \alpha a \left(\frac{Lb ki}{Lb ki'} (Mpr - ki) + \frac{Lb ka}{Lb ka'} (Mpr + ka) \right)$$

$$= \frac{3,8}{4} 0,5 \left(\frac{6}{5,4} (287,1841) + \frac{6}{5,4} (274,1087) \right)$$

$$= 296,2379 \text{ kNm}$$

$$Vu = \frac{Mu ka + Mu kb}{h}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{296,2379 + 1800,2317}{4} \\
&= 524,1174 \text{ kN} \\
V_s &= \frac{Vu}{\phi} \\
&= \frac{524,1174}{0,75} \\
&= 698,8232 \text{ kN}
\end{aligned}$$

Dalam sendi plastis

Dipakai tulangan sengkang 2 kaki D12

$$\begin{aligned}
A\Phi &= \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \\
&= \frac{1}{4} \times \pi \times 12^2 \\
&= 113,0973 \text{ mm}^2 \\
z &= \rho b + 10 + D + (0,5 \times D) \\
&= 40 + 10 + 12 + (0,5 \times 12) \\
&= 68 \text{ mm} \\
d &= h - z \\
&= 600 - 68 \\
&= 532 \text{ mm} \\
s &= \frac{n \cdot A\Phi \cdot f_y \cdot d}{V_s} \\
&= \frac{2 \times 113,0973 \times 400 \times 532}{698,8232} \\
&= 68,8790 \text{ mm}
\end{aligned}$$

Dipakai D12-100

Luar sendi plastis

$$\begin{aligned}
V_c &= \left(1 + \frac{Pu}{14Ag}\right) \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} b d \\
&= \left(1 + \frac{2344,55}{14.600.600}\right) \frac{1}{6} \sqrt{25} \times 600 \times 532 \times 10^{-3} \\
&= 123,7411 \text{ kN} \\
V_{s1} &= \frac{Vu}{\phi} - V_c
\end{aligned}$$

$$= \frac{524,1174}{0,75} - 123,7411$$

$$= 575,0820 \text{ kN}$$

Dipakai tulangan sengkang 2 kaki D12

$$A\Phi = \frac{1}{4} \times \pi \times D^2$$

$$= \frac{1}{4} \times \pi \times 12^2$$

$$= 113,0973 \text{ mm}^2$$

$$z = \rho b + 10 + D + (0,5 \times D)$$

$$= 40 + 10 + 12 + (0,5 \times 12)$$

$$= 68 \text{ mm}$$

$$d = h - z$$

$$= 600 - 68$$

$$= 532 \text{ mm}$$

$$s = \frac{n \cdot A\Phi \cdot f_y \cdot d}{V_s}$$

$$= \frac{2 \times 113,0973 \times 400 \times 532}{575,0820}$$

$$= 83,6997 \text{ mm}$$

Dipakai D12-150

Tabel 5.19 Rekapitulasi tulangan geser kolom gedung 1

Lantai	Kolom	Jumlah tulangan		Dimensi (cm)
		Dalam sendi plastis	Luar sendi plastis	
1	K1	D12-100	D12-150	600 x 600
2		D12-100	D12-150	600 x 600
3	K1	D12-100	D12-150	600 x 600
4		D12-100	D12-150	600 x 600

Tabel 5.20 Rekapitulasi tulangan geser kolom gedung 2

Lantai	Kolom	Jumlah tulangan		Dimensi (cm)
		Dalam sendi plastis	Luar sendi plastis	
1	K1	D12-100	D12-150	600 x 600
2		D12-100	D12-150	600 x 600
3	K2	D12-80	D12-120	400 x 400
4		D12-80	D12-120	400 x 400

5.1.8 Simpangan

Simpangan antar lantai dihitung berdasarkan persamaan pada subbab 3.5. Parameter untuk menghitung simpangan antar lantai adalah tinggi (h), perpindahan yang terjadi pada struktur (δ), faktor pembesaran defleksi (C_d) dan faktor keutamaan gempa (I_e). Berikut merupakan contoh perhitungan simpangan pada gedung 1 arah X.

$$\begin{aligned}
 \text{Tinggi tipikal lantai } (h_x) &= 4 \text{ m} \\
 \text{Faktor pembesaran defleksi} &= 5,5 \text{ untuk SRPMK} \\
 \text{Faktor keutamaan gempa} &= 1 \\
 \text{Perpindahan struktur lantai 1, } \delta_{x1} &= 0,00318 \text{ m} \\
 \text{Perpindahan struktur lantai 2, } \delta_{x2} &= 0,00838 \text{ m} \\
 \text{Simpangan antar lantai 1 } (\Delta_1) &= \frac{C_d \delta_{x1}}{I_e} = \frac{5,5 \times 0,00318}{1} = 0,01749 \text{ m} \\
 \text{Simpangan antar lantai 2 } (\Delta_2) &= \frac{C_d (\delta_{x2} - \delta_{x1})}{I_e} = \frac{5,5 \times (0,00838 - 0,00318)}{1} = \\
 &0,0286 \text{ m} \\
 \text{Simpangan ijin antar lantai } (\Delta_a) &= 0,02 \times h_x = 0,02 \times 4 = 0,08 \text{ m} \\
 \text{Drift ratio1} &= \frac{\Delta_1}{\Delta_a} = \frac{0,01749}{0,08} = 0,2186 \\
 \text{Drift ratio2} &= \frac{\Delta_2}{\Delta_a} = \frac{0,0286}{0,08} = 0,3575
 \end{aligned}$$

Rekapitulasi perhitungan simpangan antar lantai dapat dilihat pada Tabel 5.22 sampai Tabel 5.25.

Tabel 5.21 Rekapitulasi perhitungan *drift ratio* pada gedung 1 arah X

Lantai	h_x (m)	δ_x (m)	Cd	Ie	$\delta_{xn}-\delta_{(n-1)}$ (m)	Δx (m)	Δ_{ijin} (m)	Drift Ratio
4	4	0,0163	5,5	1	0,00328	0,01804	0,08	0,2255
3	4	0,01302	5,5	1	0,00464	0,02552	0,08	0,319
2	4	0,00838	5,5	1	0,0052	0,0286	0,08	0,3575
1	4	0,00318	5,5	1	0,00318	0,01749	0,08	0,218625

Tabel 5.22 Rekapitulasi perhitungan *drift ratio* pada gedung 1 arah Y

Lantai	h_x (m)	δ_x (m)	Cd	Ie	$\delta_{xn}-\delta_{(n-1)}$ (m)	Δx (m)	Δ_{ijin} (m)	Drift Ratio
4	4	0,01597	5,5	1	0,00346	0,01903	0,08	0,237875
3	4	0,01251	5,5	1	0,00423	0,023265	0,08	0,290813
2	4	0,00828	5,5	1	0,00513	0,028215	0,08	0,352688
1	4	0,00315	5,5	1	0,00315	0,017325	0,08	0,216563

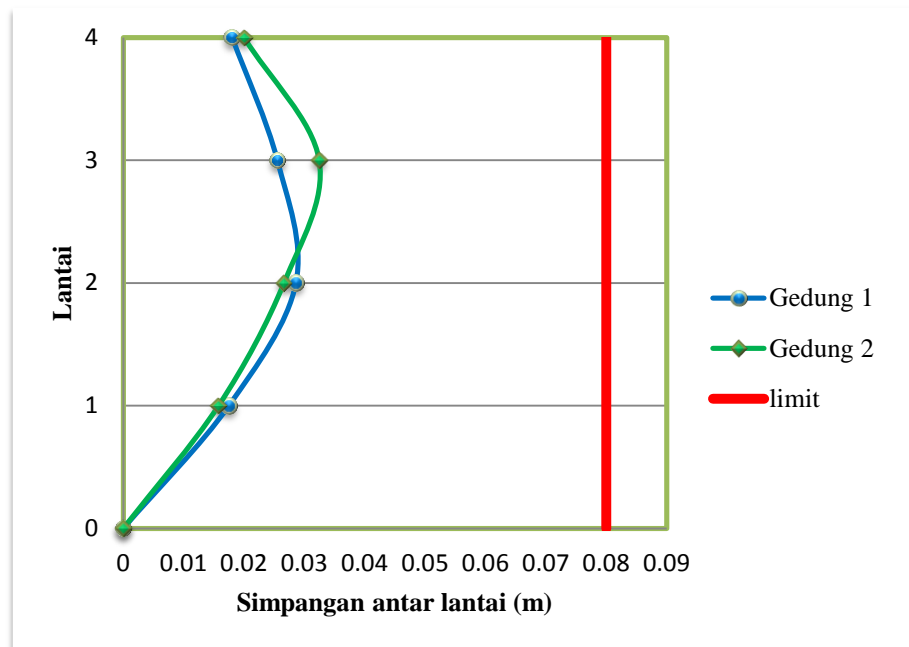
Tabel 5.23 Rekapitulasi perhitungan *drift ratio* pada gedung 2 arah X

Lantai	h_x (m)	δ_x (m)	Cd	Ie	$\delta_{xn}-\delta_{(n-1)}$ (m)	Δx (m)	Δ_{ijin} (m)	Drift Ratio
4	4	0,01725	5,5	1	0,00364	0,02002	0,08	0,25025
3	4	0,01361	5,5	1	0,0059	0,03245	0,08	0,405625
2	4	0,00771	5,5	1	0,00484	0,02662	0,08	0,33275
1	4	0,00287	5,5	1	0,00287	0,015785	0,08	0,197313

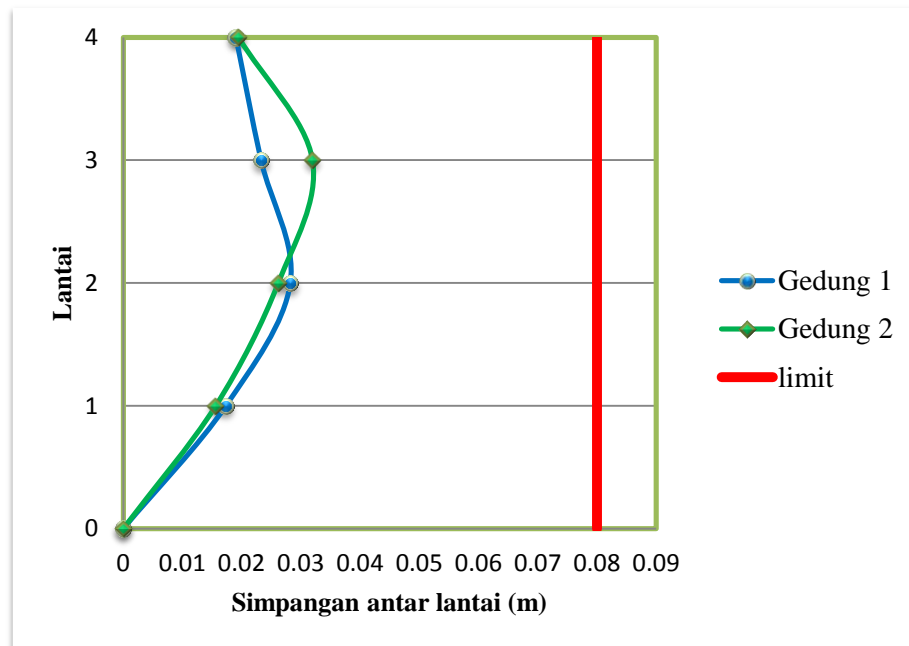
Tabel 5.24 Rekapitulasi perhitungan *drift ratio* pada gedung 2 arah Y

Lantai	h_x (m)	δ_x (m)	Cd	Ie	$\delta_{xn}-\delta_{(n-1)}$ (m)	Δx (m)	Δ_{ijin} (m)	Drift Ratio
4	4	0,01695	5,5	1	0,00354	0,01947	0,08	0,243375
3	4	0,01341	5,5	1	0,00581	0,031955	0,08	0,399438
2	4	0,0076	5,5	1	0,00476	0,02618	0,08	0,32725
1	4	0,00284	5,5	1	0,00284	0,01562	0,08	0,19525

Grafik simpangan antar lantai dari kedua gedung arah X dan arah Y dapat dilihat pada Gambar 5.11 dan Gambar 5.12.



Gambar 5.10 Simpangan antar lantai pada gedung 1 dan gedung 2 arah X



Gambar 5.11 Simpangan antar lantai pada gedung 1 dan gedung 2 arah Y

5.1.9 Kekakuan Tingkat

Parameter untuk menghitung kekakuan tingkat adalah momen inersia (I), tinggi tingkat (h), gaya lateral (V), dan modulus elastis (E). Berikut adalah contoh perhitungan kekakuan tingkat pada gedung 1 lantai 1.

$$\begin{aligned} I_b &= (1/12) \times b \times h^3 \\ &= (1/12) \times 25 \times 40 \\ &= 133333,333 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_c &= (1/12) \times b \times h^3 \\ &= (1/12) \times 60 \times 60 \\ &= 1080000 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_b &= I_b / L \\ &= 133333,333/600 \\ &= 222,2222 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_c &= I_c / h \\ &= 1080000/400 \\ &= 2700 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_c &= \left(\frac{n+j}{n+1} \right) \left(\frac{W_j}{W} \right) V \\ &= \left(\frac{4+1}{4+1} \right) \left(\frac{4152,72}{15819,1842} \right) 1126,485 \\ &= 296,2158 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} DR &= \left(\frac{k_b+k_c}{k_b \cdot k_c} \right) \left(\frac{h}{12E} \right) V_c \\ &= \left(\frac{222,2222+2700}{222,2222 \cdot 2700} \right) \left(\frac{400}{12.23500} \right) 296,2158 \\ &= 0,002046 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k &= 1 / DR \\ &= 1/0,002046 \\ &= 488,6736 \end{aligned}$$

Tabel 5.25 Kekakuan tingkat gedung 1

Lantai	I_b (cm^4)	I_c (cm^4)	k_b (cm^3)	k_c (cm^3)	V_c (kN)	DR	k	k_i/k_{i+1} (%)
1	133333,3	1080000	222,222	2700	296,2158	0,002046	488,6736	120
2	133333,3	1080000	222,222	2700	355,459	0,002456	407,228	116,6667
3	133333,3	1080000	222,222	2700	414,7021	0,002865	349,0526	91,76214
4	133333,3	1080000	222,222	2700	380,5396	0,002629	380,3885	

Tabel 5.26 Kekakuan tingkat gedung 2

Lantai	I_b (cm^4)	I_c (cm^4)	k_b (cm^3)	k_c (cm^3)	V_c (kN)	DR	k	k_i/k_{i+1} (%)
1	133333,3	1080000	222,222	2700	296,2158	0,002046	488,6736	120
2	133333,3	1080000	222,222	2700	355,459	0,002456	407,228	127,6486
3	133333,3	213333,3	222,222	533,3333	346,6469	0,003135	319,0227	87,6152
4	133333,3	213333,3	222,222	533,3333	303,7153	0,002746	364,1181	

Gedung reguler adalah gedung yang sistim strukturnya memiliki kekakuan lateral yang beraturan tanpa adanya tingkat lunak (*soft storey*). Yang dimaksud dengan struktur dengan tingkat lunak adalah suatu tingkat yangmana kekakuan lateralnya $< 70\%$ kekakuan lateral tingkat diatasnya.

5.2 ANALISIS STRUKTUR MENGGUNAKAN *PUSHOVER ANALYSIS*

5.2.1 Pembebanan Analisis *Pushover* pada SAP2000 v14

Pembebanan pada analisis *pushover* terdiri dari 2 macam, yaitu pembebanan gravitasi dan gempa lateral.

1. Pembebanan gravitasi

Pembebanan gravitasi dilakukan dengan cara klik pada *toolbar Define – Load Case*, kemudian pilih opsi *Add New Case*. *Analysis Case* diberi nama GRAVITASI, untuk *initial Condition* dipilih *Zero Initial Condition* yaitu pembebanan dilakukan pada saat kondisi awal sebelum terkena beban. Untuk lebih jelasnya dapat melihat Gambar 5.12. Pada opsi *Analysis Type* pilih *Nolinear* karena akan dilakukan analisis nonlinear. Untuk beban yang bekerja yaitu beban gravitasi

digunakan 2 macam beban, yaitu beban mati (*Dead Load*) dan beban hidup (*Live Load*). Untuk beban mati (DL) digunakan faktor skala 1 dan untuk beban hidup (LL) digunakan skala 0,25. Pada kotak dialog *Load Application* dipilih opsi *Full Load*. Pada *Parameters Result Saved* dipilih opsi *Final State Only*. Kemudian pada *Nonlinear Parameters*, pilih *Default*.

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: GRAVITASI [Set Def Name] Notes: [Modify/Show...]

Load Case Type: Static [Design...]

Initial Conditions:

- ☒ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- ☐ Continue from State at End of Nonlinear Case []

 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case: All Modal Loads Applied Use Modes from Case: MODAL []

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	DEAD	1.
Load Pattern	DEAD	1.
Load Pattern	LIVE	0.25

[Add] [Modify] [Delete]

Analysis Type:

- ☐ Linear
- ☒ Nonlinear
- ☐ Nonlinear Staged Construction

Geometric Nonlinearity Parameters:

- ☒ None
- ☐ P-Delta
- ☐ P-Delta plus Large Displacements

Other Parameters:

- Load Application: Full Load [Modify/Show...]
- Results Saved: Final State Only [Modify/Show...]
- Nonlinear Parameters: Default [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

Gambar 5.12 Pengaturan *analysis case* beban gravitasi

2. Pembebanan lateral

Setelah mendefinisikan beban gravitasi, langkah berikutnya adalah mendefinisikan beban lateral sebagai beban *pushover*. Pada analisis ini dibuat 2 pembebanan lateral. Pertama adalah beban lateral arah x dan yang kedua adalah beban lateral arah y. Masih dengan cara yang sama dengan klik pada *toolbar Define – Load Case, Add New Case*. Untuk beban lateral arah x dapat diberi nama *PUSHX* dan

beban lateral arah y diberi nama *PUSHY*. Pada *Analysis Type* dipilih opsi *Nonlinear*. Pada Initial Conditions dipilih opsi *Continue from State at End of Nonlinear Case* : GRAVITASI. Kemudian pada *push x* memasukkan beban gempa untuk arah x dan pada *push y* memasukkan beban gempa untuk arah y serta pada masing–masing *Load Applied* menggunakan *Scala Factor* = 1 seperti pada Gambar 5.13 dan Gambar 5.14.

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name <input type="text" value="PUSHX"/> <input type="button" value="Set Def Name"/>	Notes <input type="button" value="Modify/Show..."/>	Load Case Type <input type="text" value="Static"/> <input type="button" value="Design..."/>												
Initial Conditions <input type="radio"/> Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State <input checked="" type="radio"/> Continue from State at End of Nonlinear Case <input type="text" value="GRAVITASI"/> <p><small>Important Note: Loads from this previous case are included in the current case</small></p>		Analysis Type <input type="radio"/> Linear <input checked="" type="radio"/> Nonlinear <input type="radio"/> Nonlinear Staged Construction												
Modal Load Case All Modal Loads Applied Use Modes from Case <input type="text" value="MODAL"/>		Geometric Nonlinearity Parameters <input checked="" type="radio"/> None <input type="radio"/> P-Delta <input type="radio"/> P-Delta plus Large Displacements												
Loads Applied <table border="1"> <thead> <tr> <th>Load Type</th> <th>Load Name</th> <th>Scale Factor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Load Pattern</td> <td>EX</td> <td>1.</td> </tr> <tr> <td>Load Pattern</td> <td>EX</td> <td>1.</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table> <div> <input type="button" value="Add"/> <input type="button" value="Modify"/> <input type="button" value="Delete"/> </div>			Load Type	Load Name	Scale Factor	Load Pattern	EX	1.	Load Pattern	EX	1.			
Load Type	Load Name	Scale Factor												
Load Pattern	EX	1.												
Load Pattern	EX	1.												
Other Parameters <table border="1"> <tr> <td>Load Application</td> <td>Displ Control</td> <td><input type="button" value="Modify/Show..."/></td> </tr> <tr> <td>Results Saved</td> <td>Multiple States</td> <td><input type="button" value="Modify/Show..."/></td> </tr> <tr> <td>Nonlinear Parameters</td> <td>User Defined</td> <td><input type="button" value="Modify/Show..."/></td> </tr> </table>			Load Application	Displ Control	<input type="button" value="Modify/Show..."/>	Results Saved	Multiple States	<input type="button" value="Modify/Show..."/>	Nonlinear Parameters	User Defined	<input type="button" value="Modify/Show..."/>			
Load Application	Displ Control	<input type="button" value="Modify/Show..."/>												
Results Saved	Multiple States	<input type="button" value="Modify/Show..."/>												
Nonlinear Parameters	User Defined	<input type="button" value="Modify/Show..."/>												
		<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/>												

5.13 Pengaturan *Analysis Case* beban lateral arah X

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: Notes:

Load Case Type:

Initial Conditions:

☐ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

☒ Continue from State at End of Nonlinear Case

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type:

☐ Linear

☒ Nonlinear

☐ Nonlinear Staged Construction

Modal Load Case:

All Modal Loads Applied Use Modes from Case

Geometric Nonlinearity Parameters:

☒ None

☐ P-Delta

☐ P-Delta plus Large Displacements

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	EY	1.
Load Pattern	EY	1.

Other Parameters:

Load Application:

Results Saved:

Nonlinear Parameters:

Gambar 5.14 Pengaturan *Analysis Case* beban lateral arah Y

Pada kotak dialog *Load Application* dipilih *Modify/Show* sehingga keluar menu *Load Application Control for Nonlinear Static Analysis* seperti pada Gambar 5.15. Untuk *Control Displacement* dipilih *Use Monitored Displacement* dengan *Monitered Displacement* sebesar 5% dari tinggi masing-masing bangunan yang ditinjau, misal untuk bangunan 4 tingkat yaitu $16 \text{ m} \times 5\% = 0,90 \text{ m}$. Lalu *Monitered Displacement* dipilih DOF arah U1 untuk arah x dan U2 untuk arah y pada joint yang berada pada lantai atap masing-masing bangunan.

Load Application Control for Nonlinear Static Analysis

Load Application Control

☐ Full Load

☒ Displacement Control

Control Displacement

☐ Use Conjugate Displacement

☒ Use Monitored Displacement

Load to a Monitored Displacement Magnitude of

Monitored Displacement

☒ DOF at Joint

☐ Generalized Displacement

OK Cancel

Gambar 5.15 Load Application Control for Nonlinear Static Analysis

Pada parameter *Result Saved* diambil opsi *Multiple States* dengan *Minimum Number of Saved States* = 10 dan *Maximum* = 100 seperti pada Gambar 5.16. Kemudian pada *Nonlinear Parameter* pilih *Modify/Show* dan dapat diisi seperti pada Gambar 5.17.

Results Saved for Nonlinear Static Load Cases

Results Saved

☐ Final State Only ☒ Multiple States

For Each Stage

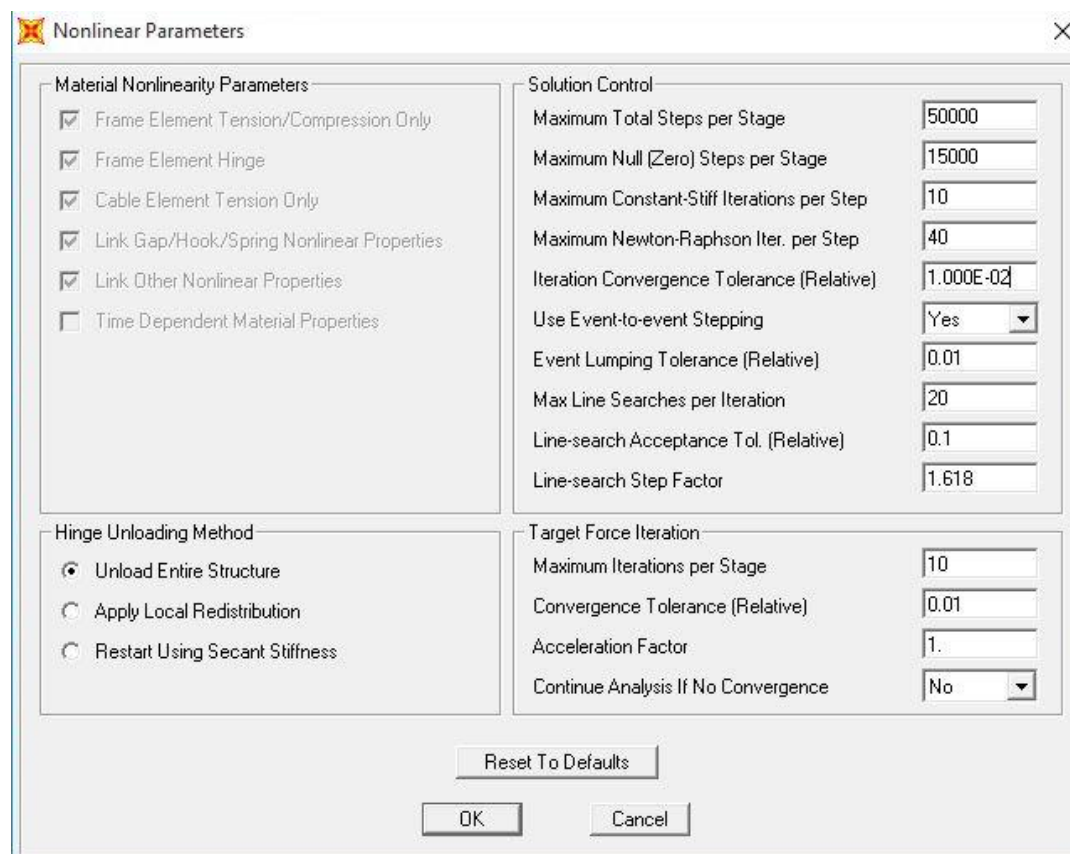
Minimum Number of Saved States

Maximum Number of Saved States

☒ Save positive Displacement Increments Only

OK Cancel

Gambar 5.16 Result Save for Nonlinear Static Load Cases





Gambar 5.17 *Nonlinear Parameter*

Untuk mendapatkan perpindahan global maksimum (elastis dan inelastis) yang disebut “target perpindahan” (δT), diperlukan faktor koefisien C_0 , C_1 , C_2 dan C_3 . Parameter-parameter dalam metode koefisien perpindahan dapat dimodifikasi sesuai dengan kondisi di lapangan. Pada penelitian ini, sebagai input data parameter untuk metode Koefisien Perpindahan (FEMA 356) pada program SAP2000, untuk *demand spectrum definition* digunakan Respon spektrum untuk jenis tanah sedang, koefisien untuk memperhitungkan factor reduksi gempa (R) dan faktor keutamaan gedung (I) yang digunakan untuk koreksi ordinat spektrum respon sebesar $\frac{I}{R} g = \frac{1}{1} 9,81 = 9,81$ dan *characteristic period of respon spectrum* (T_s) ditentukan 0,5 det, dimana nilai T_s merupakan nilai T pada *short period*. Dari Tabel 3-1 FEMA 356 diperoleh nilai $C_m = 0,9$ untuk tipe bangunan CMF (*concrete moment frame*) 4 lantai, dari Tabel 3-3 FEMA 356 diperoleh nilai $C_2 = 1,0$ dan nilai $C_3 = 1,0$ diambil berdasarkan

pertimbangan *engineering judgement*, dimana perilaku hubungan gaya geser dasar – lendutan pada kondisi pasca leleh kekakuannya positif (kurva meningkat).

Perpindahan (FEMA 356) secara otomatis akan dilakukan menggunakan program SAP2000. Modifikasi input data parameter untuk metode Koefisien Perpindahan (FEMA 356) pada program SAP2000 dapat dilihat pada Gambar 5.18.

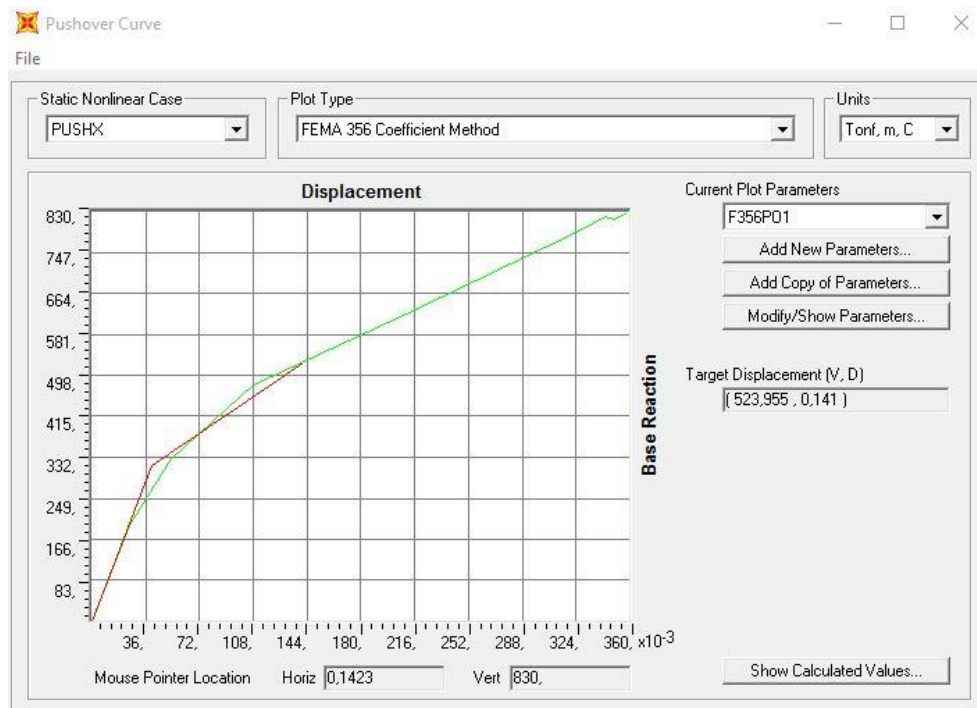
Parameters For FEMA 356 Coefficient Method

Pushover Parameters Name		Units
Name	F356P01	Tonf, m, C
Demand Spectrum Definition		
Effective Viscous Damping ($0 < \text{Damp} < 1$)		0,05
<input checked="" type="radio"/> Defined Function	Response	
Scale Factor	9,81	
Characteristic Period of Resp Spec, Ts	0,5	
<input type="radio"/> FEMA 356 General Response Spectrum		
Mapped Spectral Accel at Short Period, Ss		
Mapped Spectral Accel at 1 Sec Period, S1		
Site Class		
Selected Coefficients		
<input checked="" type="checkbox"/> User Value for C2	1,	
<input checked="" type="checkbox"/> User Value for C3	1,	
<input checked="" type="checkbox"/> User Value for Cm	0,9	
Items Visible On Plot		
<input checked="" type="checkbox"/> Show Capacity Curve	Color	
<input checked="" type="checkbox"/> Show Idealized Bilinear Force-Displ Curve	Color	
Reset Default Colors		
Update Plot		Set Axis Labels and Range...
OK		Cancel

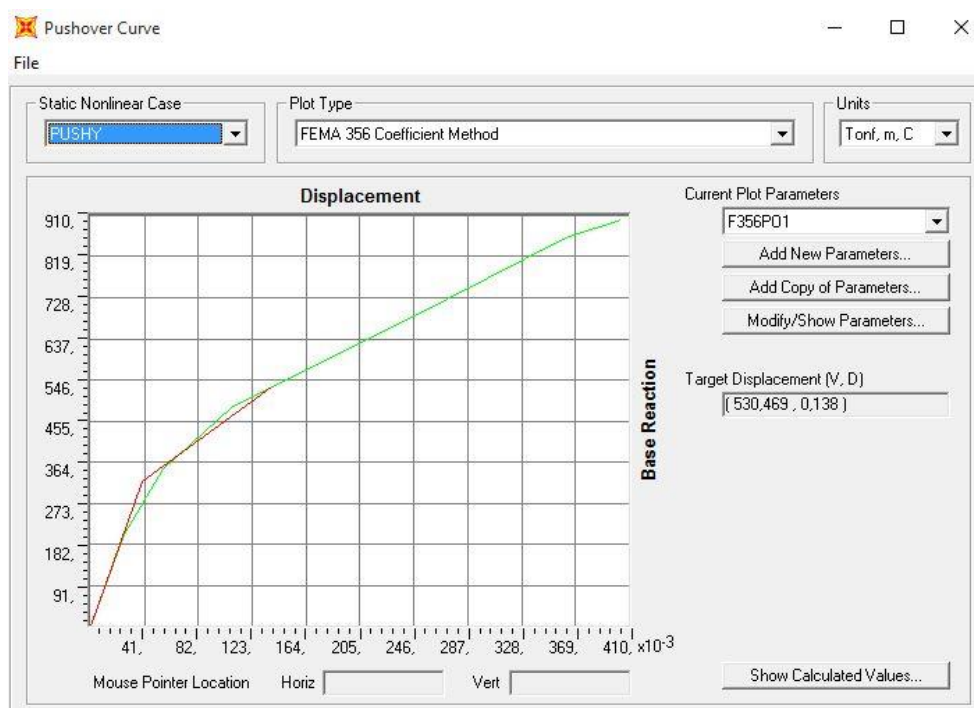
Gambar 5.18 Modifikasi parameter metode Koefisien Perpindahan

5.2.2 Kurva Kapasitas (*Capacity Curve*) Gedung 1

Untuk melihat kurva kapasitas, klik menu *Display – Show Statistic Pushover Curve*. Kurva kapasitas adalah kurva yang menunjukkan hubungan antara perpindahan yang tertangkap (*Monitored Displacement*) dan gaya geser resultan (*Resultant Base Shear*) yang diakibatkan oleh beban statik sampai pada kondisi ultimit bangunan atau target *displacement* yang telah ditentukan. Kurva kapasitas pada masing-masing arah pembebanan dapat dibandingkan untuk mengetahui perbedaan nilai *Base Reaction* (*V*) dan *Displacement* (*Δ*). Hasil kuva kapasitas dari hasil analisis dengan metode koefisien perpindahan (FEMA 356) dapat dilihat pada Gambar 5.19 dan Gambar 5.20 serta Tabel 5.27 dan Tabel 5.28.



Gambar 5.19 Kurva *pushover* arah X dengan metode koefisien perpindahan (FEMA 356) pada gedung 1



Gambar 5.20 Kurva *pushover* arah Y dengan metode koefisien perpindahan (FEMA 356) pada gedung 1

Table 5.27 Data *pushover* gedung 1 arah X

Step	Displacement	BaseForce
	m	Tonf
0	0,000000	0,0000
1	0,024830	193,7008
2	0,052617	329,8157
3	0,108323	477,5856
4	0,209810	621,3229
5	0,326439	791,3440
6	0,343172	817,5229
7	0,350041	813,5616
8	0,358601	827,0667

Table 5.28 Data *pushover* gedung 1 arah Y

<i>Step</i>	<i>Displacement</i>	<i>BaseForce</i>
	m	Tonf
0	0,000000	0,0000
1	0,024915	202,2776
2	0,055178	348,8471
3	0,107041	485,1496
4	0,271183	724,9507
5	0,361631	859,1113
6	0,403639	901,8393

Gaya geser dasar dan *displacement* yang terjadi pada saat target perpindahan tercapai pada pembebanan *pushover* arah X dan arah Y dapat dilihat pada Tabel 5.29.

Tabel 5.29 Target perpindahan dengan metode FEMA 356 pada gedung 1

Arah pembebanan <i>pushover</i>	Gara geser dasar (V_1) (Ton)	Target Perpindahan (FEMA 356)	
		V_t (Ton)	δ_t (m)
Arah X	118,908	523,955	0,141
Arah Y	118,908	530,469	0,138

Dari Tabel 5.29 dapat dilihat besarnya nilai gaya geser dasar akibat beban lateral arah x sebesar $V_t = 523,955 \text{ Ton} > V_1 = 118,908 \text{ Ton}$ dan arah y $V_t = 530,469 \text{ Ton} > V_1 = 118,908 \text{ Ton}$, maka berdasarkan metode koefisien perpindahan (FEMA 356) perilaku struktur arah x dan arah y pada gempa rencana dalam kondisi inelastik. Batasan maksimum simpangan untuk kondisi batas ultimit menurut SNI 03-1726-2002 = $0,02 H = 0,02 \times 16 \text{ m} = 0,32 \text{ m}$. Target *displacement* hasil analisis *pushover* akibat beban lateral arah X sebesar $0,141 \text{ m} < 0,32 \text{ m}$ dan akibat beban lateral arah Y sebesar $0,138 \text{ m} < 0,32 \text{ m}$ sehingga struktur tersebut memenuhi syarat keamanan.

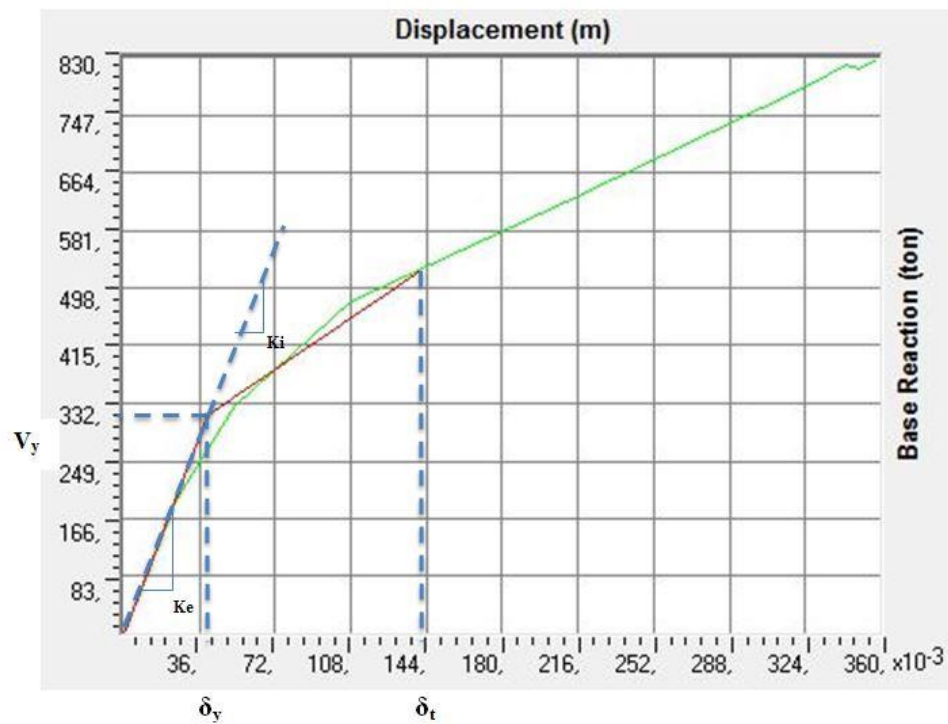
Waktu getar alami yang memperhitungkan kondisi in-elastis atau waktu getar efektif, T_e , dapat diperoleh dengan bantuan kurva hasil analisa *pushover* dengan metode Koefisien Perpindahan FEMA 356. Nilai waktu getar alami awal elastis (T_i)

dan kekakuan awal bangunan pada arah yang ditinjau (K_i) , kekakuan lateral efektif bangunan (K_e) , waktu getar alami efektif (T_e) dan rasio kekakuan pasca leleh terhadap kekakuan elastik efektif (α) hasil analisis *pushover* dengan metode koefisien perpindahan FEMA 356 pada pembebanan *pushover* arah X dan arah Y dapat dilihat pada Tabel 5.30.

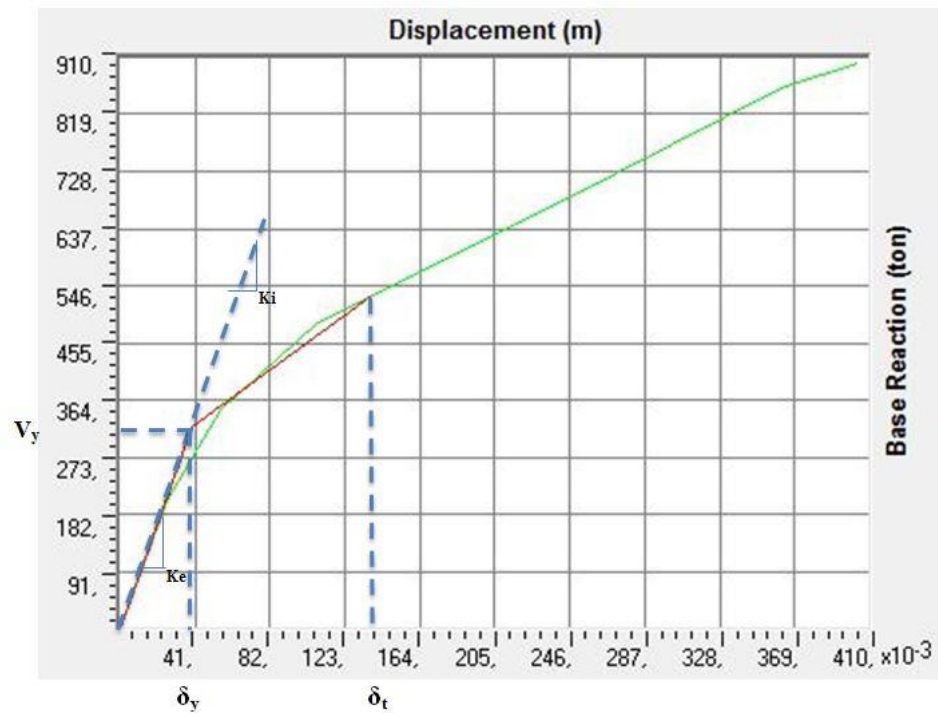
Tabel 5.30 Nilai waktu getar alami efektif dengan metode koefisien perpindahan FEMA 356 (gedung 1)

Arah pembebanan <i>pushover</i>	T_i (det)	K_i (T/m)	K_e (T/m)	T_e (det)	α
Arah x	1,2216	7801,0097	7801,0097	1,2216	0,2669
Arah y	1,1999	8118,7971	8118,7971	1,1999	0,2781

Parameter waktu getar alami efektif dari kurva *pushover* pada pembebanan arah X dan arah Y dapat dilihat pada Gambar 5.21 dan Gambar 5.22.

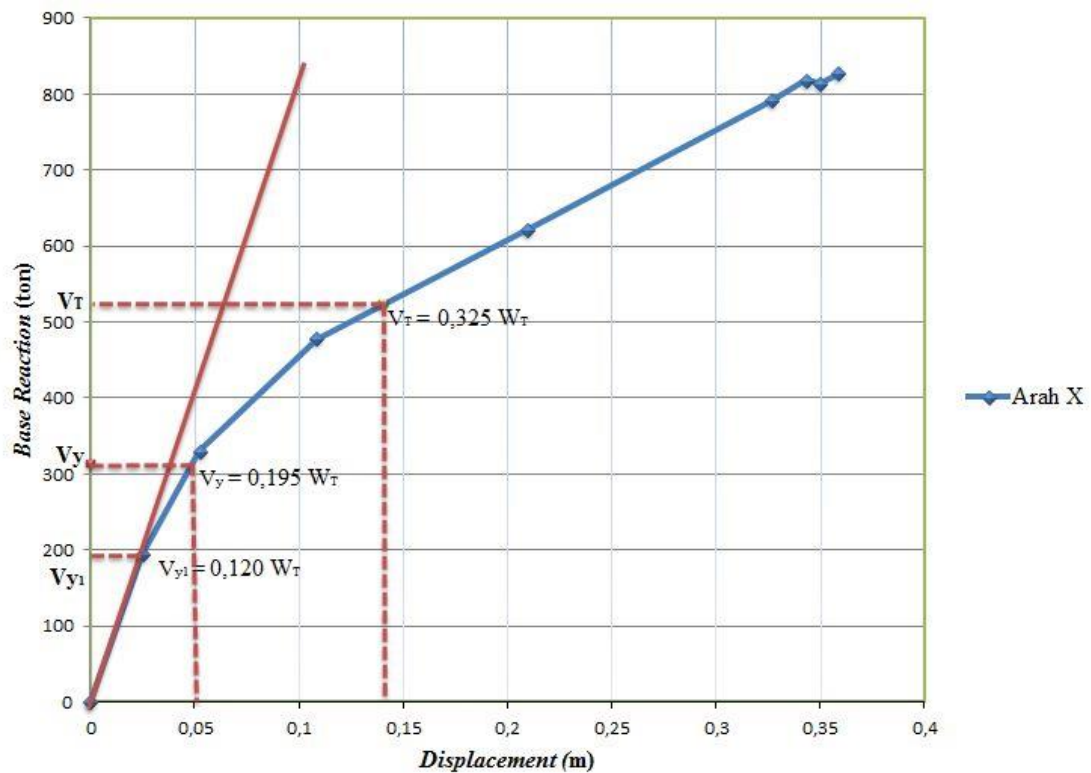


Gambar 5.21 parameter waktu getar alami efektif dari kurva *pushover* pada pembebanan arah X (gedung 1)

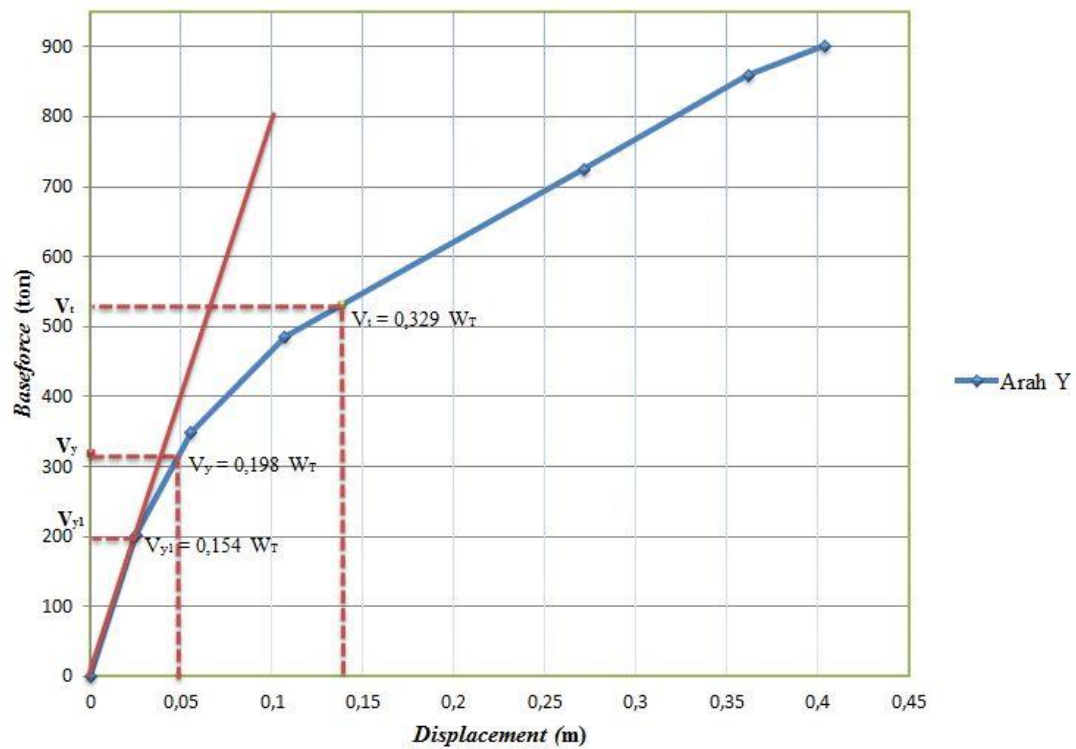


Gambar 5.22 Parameter waktu getar alami efektif dari kurva *pushover* pada pembebanan arah Y (gedung 1)

Diketahui pada saat titik kinerja tercapai pada arah pembebanan X dengan $V_t = 523,955$ Ton dan pada arah pembebanan Y $V_t = 530,469$ Ton, berat total bangunan pada gedung 1 adalah $W_T = 1612,557$ Ton. Berdasarkan persamaan $V = C_s \times W$ pada arah pembebanan X tercapai pada saat $0,325 W_T$ dan pada arah pembebanan Y tercapai pada saat $0,329 W_T$. Sedangkan $V_y = 314,1251$ Ton tercapai pada saat $0,195 W_T$ pada arah pembebanan X dan $V_y = 319,564$ Ton tercapai pada saat $0,198 W_T$ pada arah pembebanan Y. Kondisi ini dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 5.23 dan Gambar 5.24.

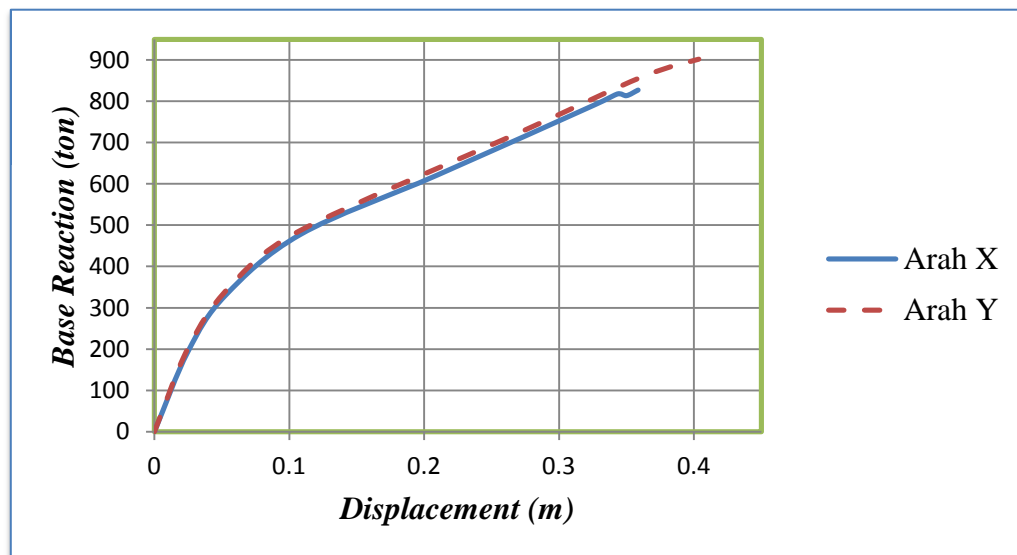


Gambar 5.23 Ilustrasi gaya geser yang terjadi pada pembebanan arah X terhadap berat total bangunan (gedung 1)



Gambar 5.24 Ilustrasi gaya geser yang terjadi pada pembebanan arah Y terhadap berat total bangunan (gedung 1)

Sedangkan perbandingan kurva kapasitas antara arah X dan arah Y dapat dilihat pada Gambar 5.25.



Gambar 5.25 Perbandingan kurva kapasitas gedung 1

Terlihat perbedaan dari grafik di atas berupa *displacement* dan *base reaction* yang memiliki nilai berbeda dari kedua arah pembebanan. Pada pembebanan arah Y terlihat memiliki *base reaction* dan *displacement* yang lebih besar daripada pembebanan arah X. Perbedaan tersebut dapat diakibatkan oleh perbedaan bentang dari kedua arah pembebanan yang berakibat juga pada perbedaan daktilitas yang dimiliki dari kedua arah pembebanan tersebut. Pada pembebanan arah Y memiliki daktilitas yang lebih besar, dapat dibuktikan dengan menggunakan rumus daktilitas simpangan sebagai berikut.

$$\mu_X = \frac{\Delta_{uX}}{\Delta_{yX}} = \frac{0,358601}{0,04462} = 8,0368$$

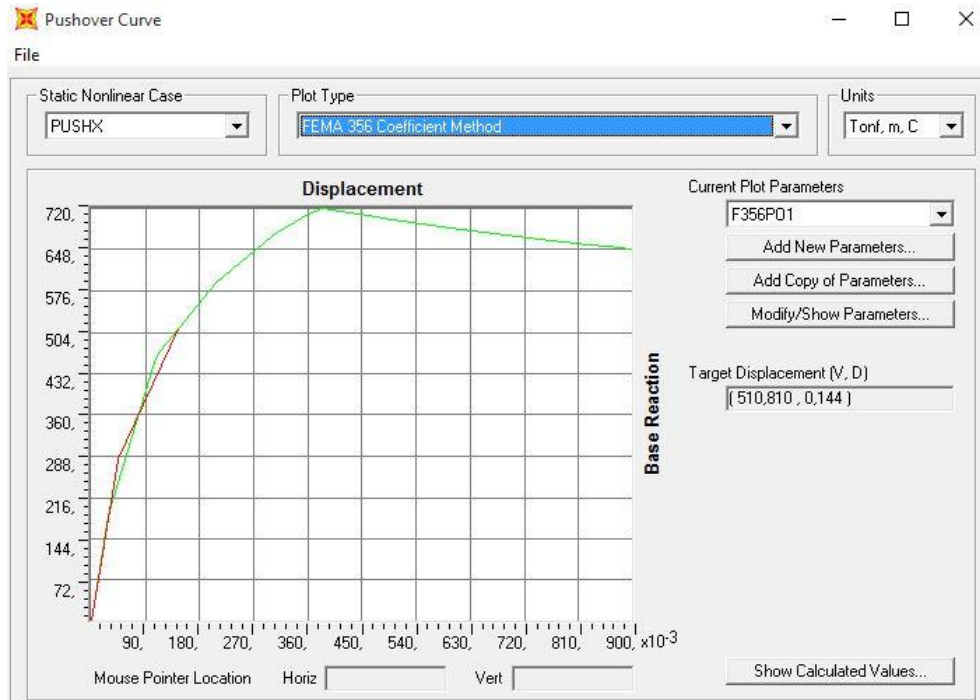
$$\mu_Y = \frac{\Delta_{uY}}{\Delta_{yY}} = \frac{0,403639}{0,048178} = 8,3781$$

Dimana :

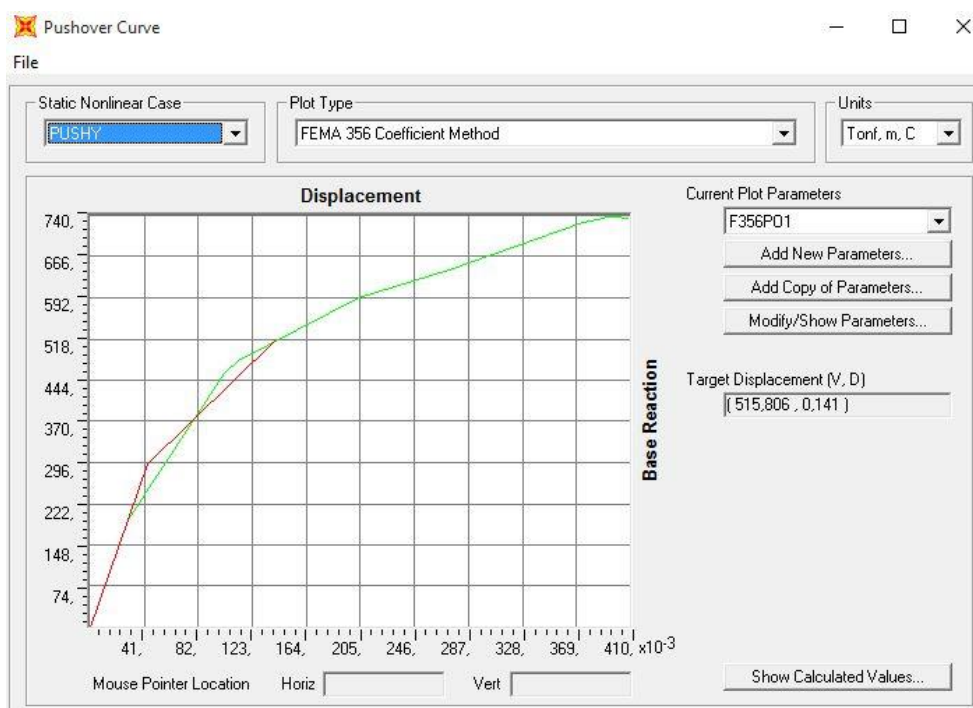
- $\mu_{x,y}$ = daktilitas simpangan pada arah X atau Y
- Δ_u = simpangan ultimit (*ultimate displacement*)
- Δ_y = simpangan pada saat leleh (*yield displacement*)

5.2.3 Kurva Kapasitas (*Capacity Curve*) Gedung 2

Kurva kapasitas pada masing-masing arah pembebanan dapat dibandingkan untuk mengetahui perbedaan nilai *Base Reaction* (V) dan *Displacement* (Δ). Hasil kuva kapasitas dari hasil analisis dengan metode koefisien perpindahan (FEMA 356) dapat dilihat pada Gambar 5.26 dan Gambar 5.27 serta Tabel 5.31 dan Tabel 5.32.



Gambar 5.26 Kurva *pushover* arah X dengan metode koefisien perpindahan (FEMA 356) pada gedung 2



Gambar 5.27 Kurva *pushover* arah Y dengan metode koefisien perpindahan (FEMA 356) pada gedung 2

Tabel 5.31 Data *pushover* gedung 2 arah X

Step	Displacement	BaseForce
	m	Tonf
0	0,000000	0,0000
1	0,028539	185,9298
2	0,103864	450,9171
3	0,113133	472,2253
4	0,206477	589,9251
5	0,299961	671,0668
6	0,309224	678,5616
7	0,364724	713,792
8	0,378228	718,5586
9	0,380235	718,8213
10	0,380983	718,8805
11	0,381795	718,9162
12	0,382805	718,9454
13	0,383442	718,9435
14	0,384794	718,9116
15	0,475031	704,5694

Lanjutan **Tabel 5.31** Data *pushover* gedung 2 arah X

<i>Step</i>	<i>Displacement</i>	<i>BaseForce</i>
	m	Tonf
16	0,496990	701,1941
17	0,499628	700,9427
18	0,596633	686,8143
19	0,726255	669,3711
20	0,826311	657,2935
21	0,826311	657,2935
22	0,859982	653,2861
23	0,859982	653,2861
24	0,896018	649,0925
25	0,896018	649,0925
26	0,900000	648,6259

Tabel 5.32 Data *pushover* gedung 2 arah Y

<i>Step</i>	<i>Displacement</i>	<i>BaseForce</i>
	m	Tonf
0	0,000000	0,0000
1	0,028749	194,0749
2	0,101353	455,7475
3	0,112310	480,0848
4	0,203154	592,4616
5	0,272572	641,8502
6	0,373503	726,4874
7	0,390157	736,2092
8	0,391422	736,679
9	0,393599	737,1667
10	0,394957	737,2861
11	0,395762	737,2503
12	0,396871	737,1564
13	0,409325	735,4095
14	0,409325	735,4095

Gaya geser dasar dan *displacement* yang terjadi pada saat target perpindahan tercapai pada pembebanan *pushover* arah X dan arah Y dapat dilihat pada Tabel 5.33.

Tabel 5.33 Target perpindahan dengan metode FEMA 356 pada gedung 2

Arah pembebanan <i>pushover</i>	Gara geser dasar (V_I) (Ton)	Target Perpindahan (FEMA 356)	
		V_t (Ton)	δ_t (m)
Arah X	109,058	510,810	0,144
Arah Y	109,058	515,806	0,141

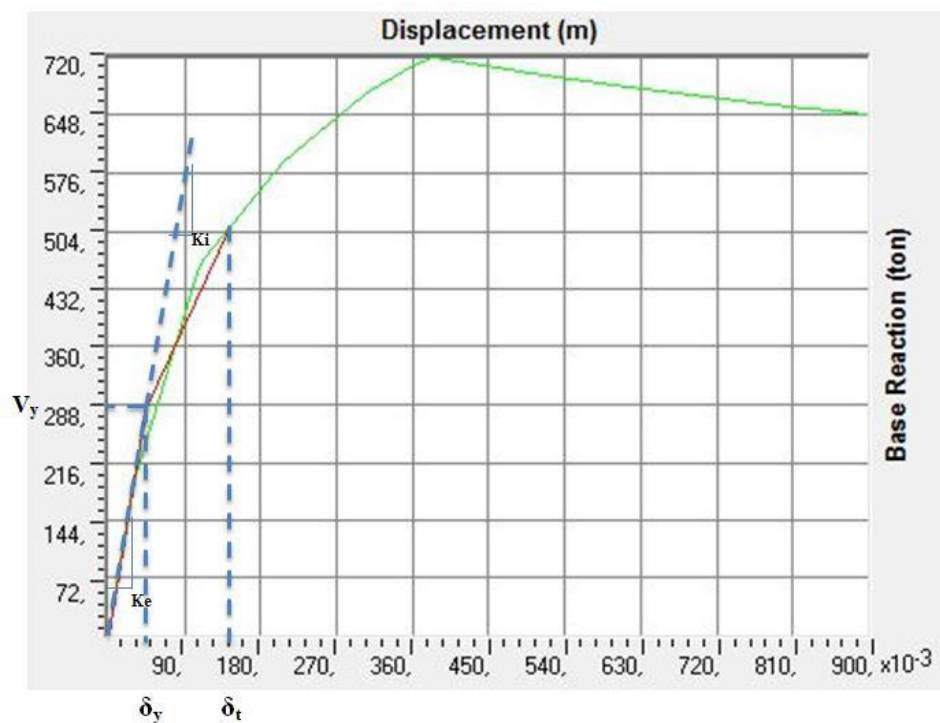
Dari Tabel 5.33 dapat dilihat besarnya nilai gaya geser dasar akibat beban lateral arah x sebesar $V_t = 510,810 \text{ Ton} > V_I = 109,058 \text{ Ton}$ dan arah y $V_t = 515,806 \text{ Ton} > V_I = 109,058 \text{ Ton}$, maka berdasarkan metode koefisien perpindahan (FEMA 356) perilaku struktur arah x dan arah y pada gempa rencana dalam kondisi inelastik. Batasan maksimum simpangan untuk kondisi batas ultimit menurut SNI 03-1726-2002 = $0,02 H = 0,02 \times 16 \text{ m} = 0,32 \text{ m}$. Target *displacement* hasil analisis *pushover* akibat beban lateral arah X sebesar $0,144 \text{ m} < 0,32 \text{ m}$ dan akibat beban lateral arah Y sebesar $0,141 \text{ m} < 0,32 \text{ m}$ sehingga struktur tersebut memenuhi syarat keamanan.

Waktu getar alami yang memperhitungkan kondisi in-elastis atau waktu getar efektif, T_e , dapat diperoleh dengan bantuan kurva hasil analisa *pushover* dengan metode Koefisien Perpindahan FEMA 356. Nilai waktu getar alami awal elastis (T_i) dan kekakuan awal bangunan pada arah yang ditinjau (K_i), kekakuan lateral efektif bangunan (K_e), waktu getar alami efektif (T_e) dan rasio kekakuan pasca leleh terhadap kekakuan elastik efektif (α) hasil analisis *pushover* dengan metode koefisien perpindahan FEMA 356 pada pembebanan *pushover* arah X dan arah Y dapat dilihat pada Tabel 5.35.

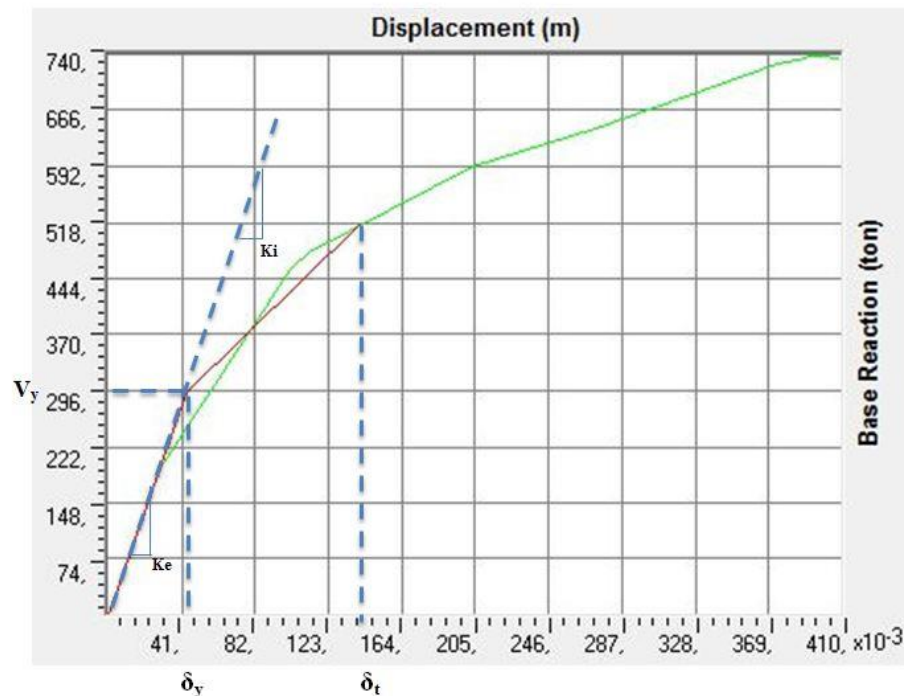
Tabel 5.34 Nilai waktu getar alami efektif dengan metode koefisien perpindahan
FEMA 356 (gedung 2)

Arah pembebanan <i>pushover</i>	Ti (det)	Ki (T/m)	Ke (T/m)	Te (det)	α
Arah x	1,2549	6514,8763	6514,8763	1,2549	0,3486
Arah y	1,2339	6750,7104	6750,7104	1,2339	0,3381

Parameter waktu getar alami efektif dari kurva *pushover* pada pembebanan arah X dan arah Y dapat dilihat pada Gambar 5.28 dan Gambar 5.29

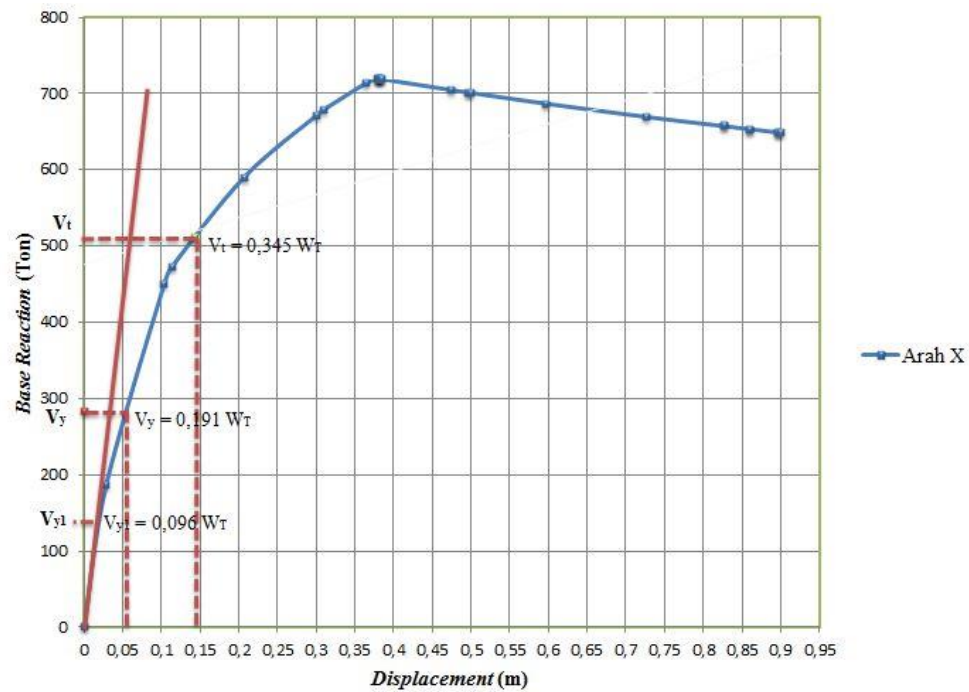


Gambar 5.28 Parameter waktu getar alami efektif dari kurva *pushover* pada pembebanan arah X (gedung 2)

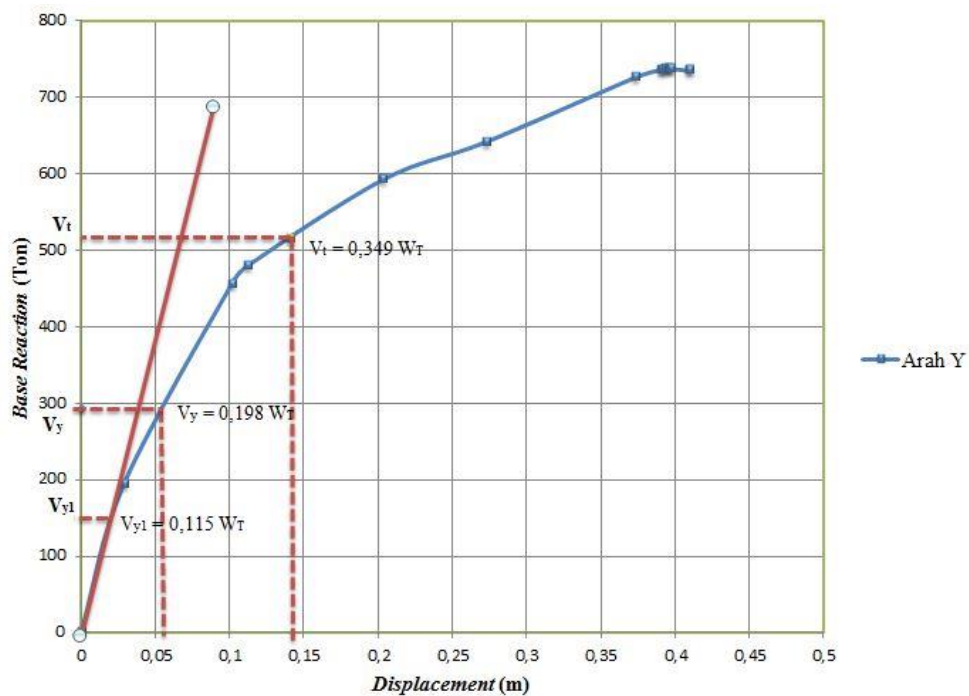


Gambar 5.29 Parameter waktu getar alami efektif dari kurva *pushover* pada pembebanan arah Y (gedung 2)

Diketahui pada saat titik kinerja tercapai pada arah pembebanan X dengan $V_t = 510,810$ Ton dan pada arah pembebanan Y $V_t = 515,806$ Ton, berat total bangunan pada gedung 2 adalah $W_T = 1478,981$ Ton. Berdasarkan persamaan $V = C_s \times W$ pada arah pembebanan X tercapai pada saat $0,345 W_T$ dan pada arah pembebanan Y tercapai pada saat $0,349 W_T$. Sedangkan $V_y = 283,099$ Ton tercapai pada saat $0,191 W_T$ pada arah pembebanan X dan $V_y = 292,474$ Ton tercapai pada saat $0,198 W_T$ pada arah pembebanan Y. Kondisi ini dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 5.30 dan Gambar 5.31.

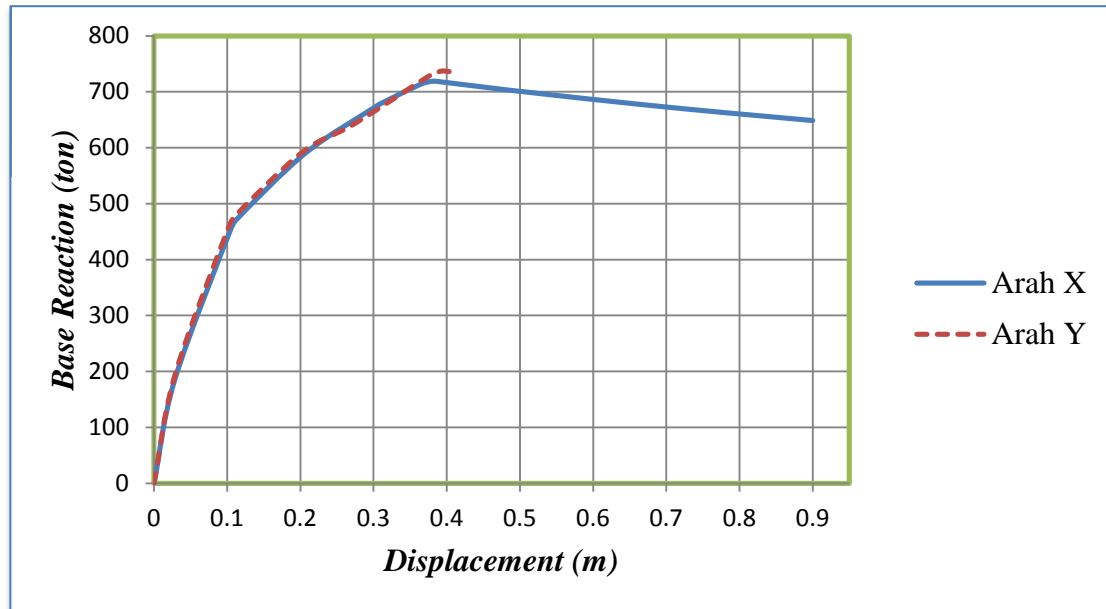


Gambar 5.30 Ilustrasi gaya geser yang terjadi pada pembebanan arah X terhadap berat total bangunan (gedung 2)



Gambar 5.31 Ilustrasi gaya geser yang terjadi pada pembebanan arah Y terhadap berat total bangunan (gedung 2)

Sedangkan perbandingan kurva kapasitas antara arah X dan arah Y dapat dilihat pada Gambar 5.32.



Gambar 5.32 Perbandingan kurva kapasitas gedung 2

Terlihat perbedaan dari grafik di atas berupa *displacement* dan *base reaction* yang memiliki nilai berbeda dari kedua arah pembebanan. Pada pembebanan arah X terlihat memiliki *displacement* yang lebih besar daripada pembebanan arah Y, tapi memiliki *base reaction* yang lebih kecil daripada pembebanan arah Y. Perbedaan tersebut dapat diakibatkan oleh perbedaan bentang dari kedua arah pembebanan yang berakibat juga pada perbedaan daktilitas yang dimiliki dari kedua arah pembebanan tersebut. Daktilitas pada pembebanan arah Y lebih besar, dapat dibuktikan dengan menggunakan rumus daktilitas simpangan sebagai berikut.

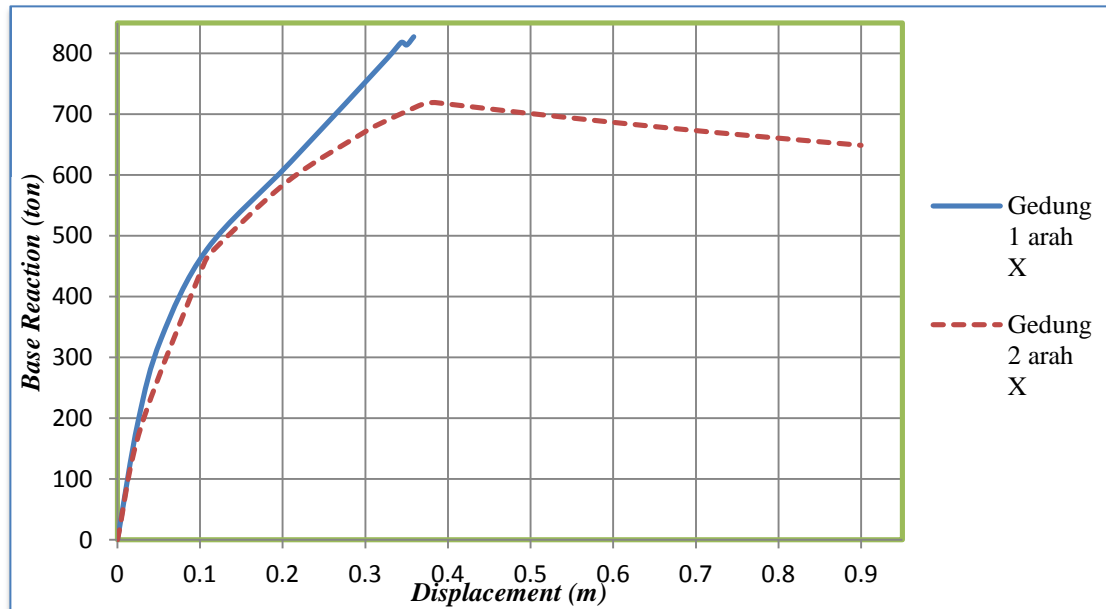
$$\mu_X = \frac{\Delta_{uX}}{\Delta_{yX}} = \frac{0,382805}{0,053864} = 7,10688$$

$$\mu_Y = \frac{\Delta_{uY}}{\Delta_{yY}} = \frac{0,394957}{0,051353} = 7,68991$$

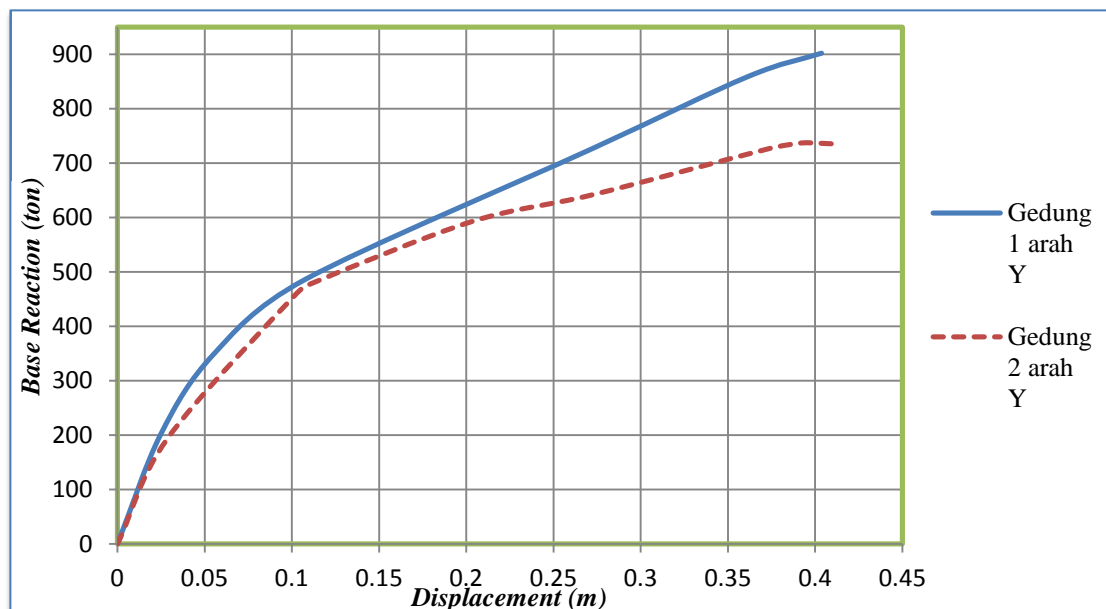
Dimana :

- $\mu_{x,y}$ = daktilitas simpangan pada arah X atau Y
- Δ_u = simpangan ultimit (*ultimate displacement*)
- Δ_y = simpangan pada saat leleh (*yield displacement*)

Adapun perbandingan kurva kapasitas antara kedua gedung tiap masing-masing arah yang terdapat pada Gambar 5.33 dan Gambar 5.34.



Gambar 5.33 Perbandingan kurva kapasitas gedung 1 dan gedung 2 arah X

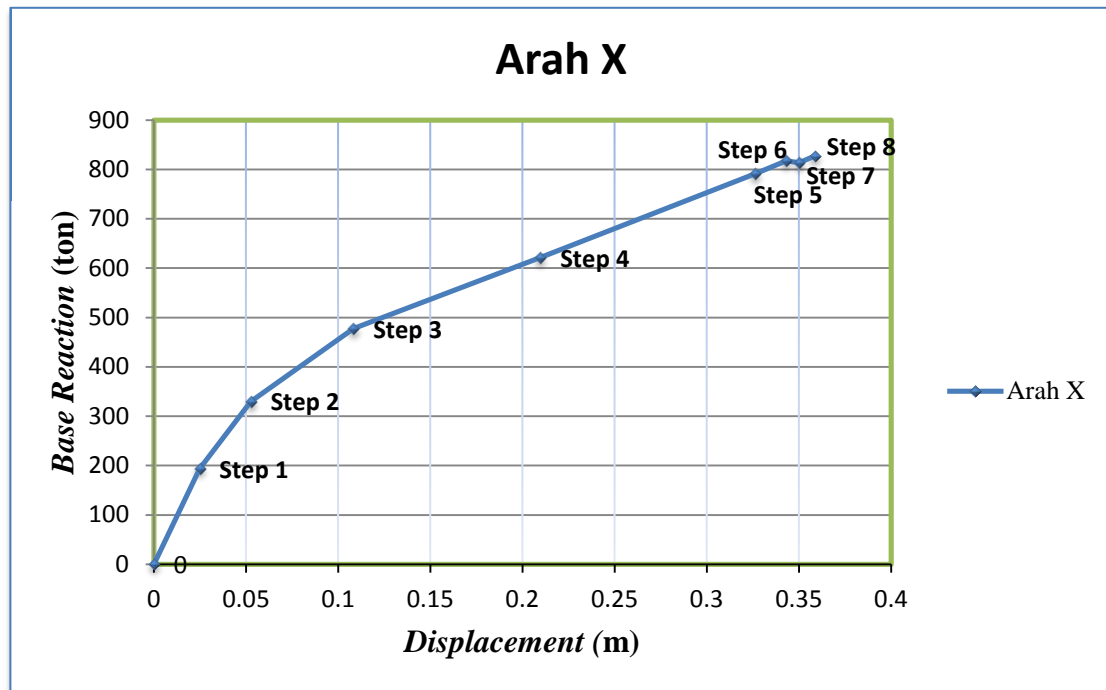


Gambar 5.34 Perbandingan kurva kapasitas gedung 1 dan gedung 2 arah Y

Dari grafik di atas dapat terlihat perbedaan antara kurva kapasitas gedung 1 dan kurva kapasitas gedung 2, dimana pada gedung 1 terlihat bahwa dapat menahan *baseforce* lebih besar daripada gedung 2. Perbedaan ini dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu perbedaan ukuran kolom yang digunakan pada gedung 2 dan selain itu juga dipengaruhi oleh perbedaan berat total bangunan tersebut. Dari grafik tersebut juga terlihat bahwa gedung 1 memiliki kekakuan yang lebih tinggi besar, dengan nilai $K_e = 7801,0097 \text{ T/m}$ untuk arah X dan $K_e = 8118,7971 \text{ T/m}$ untuk arah Y. Sedangkan nilai kekakuan gedung 2 sebesar $K_e = 6514,8763 \text{ T/m}$ untuk arah X dan $K_e = 6750,7104 \text{ T/m}$ untuk arah Y.

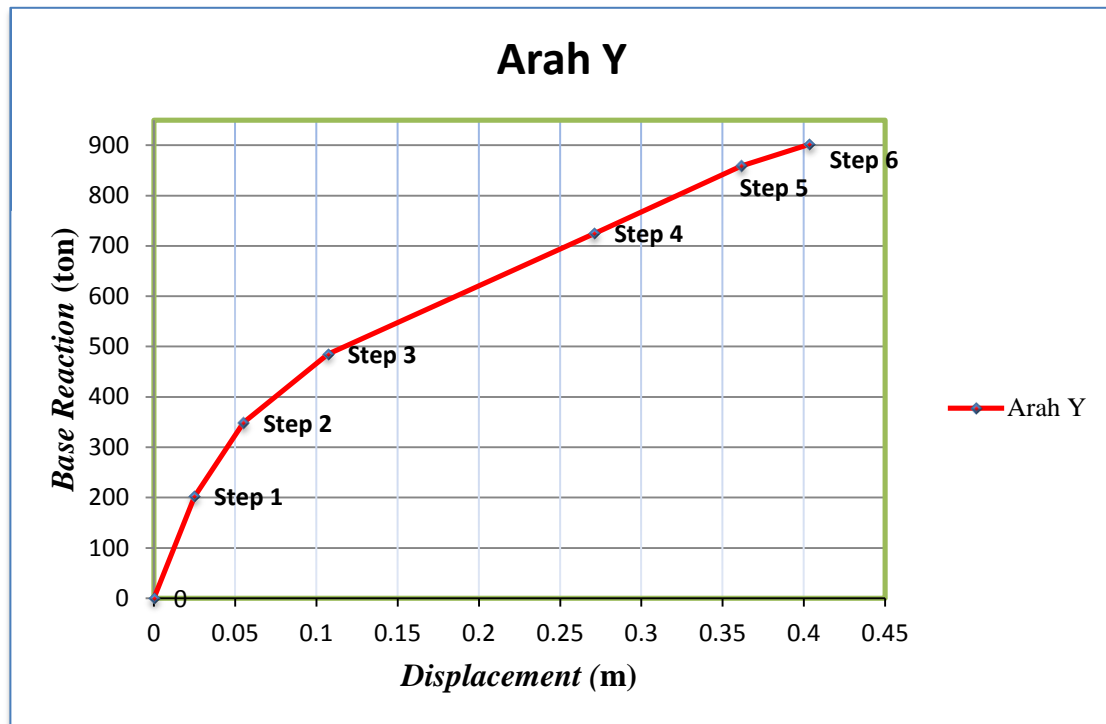
5.2.4 Sendi plastis Gedung 1

Untuk melihat mekanisme sendi plastis yang terjadi pada struktur klik menu *Display – Show Deformed Shape*, lalu pada kolom *Case/Combo Name* pilih definisi beban lateral yang telah dibuat misal PUSHX untuk beban lateral arah x dan PUSHY untuk beban lateral arah y. Kemudian pada pilihan *Multivalued Option* pilih *step* ke berapa sendi plastis pertama struktur muncul sampai kondisi struktur inelastis. Sendi plastis terjadi ketika besar gaya geser dan gaya lentur yang terjadi akibat beban gempa, lebih besar daripada kapasitas struktur tersebut.



Gambar 5.35 Sendi plastis struktur gedung 1 arah X

Sendi plastis pada gedung 1 arah X pertama terjadi pada balok lantai 4 pada step ke-1 yang dapat terlihat pada Lampiran 11. Sendi plastis terbesar terjadi pada step ke-8 pada step ke-8 ini sendi plastis sudah terjadi juga pada kolom lantai 1 dan pada step ini bangunan sudah mengalami keruntuhan yang terlihat pada Lampiran 14.

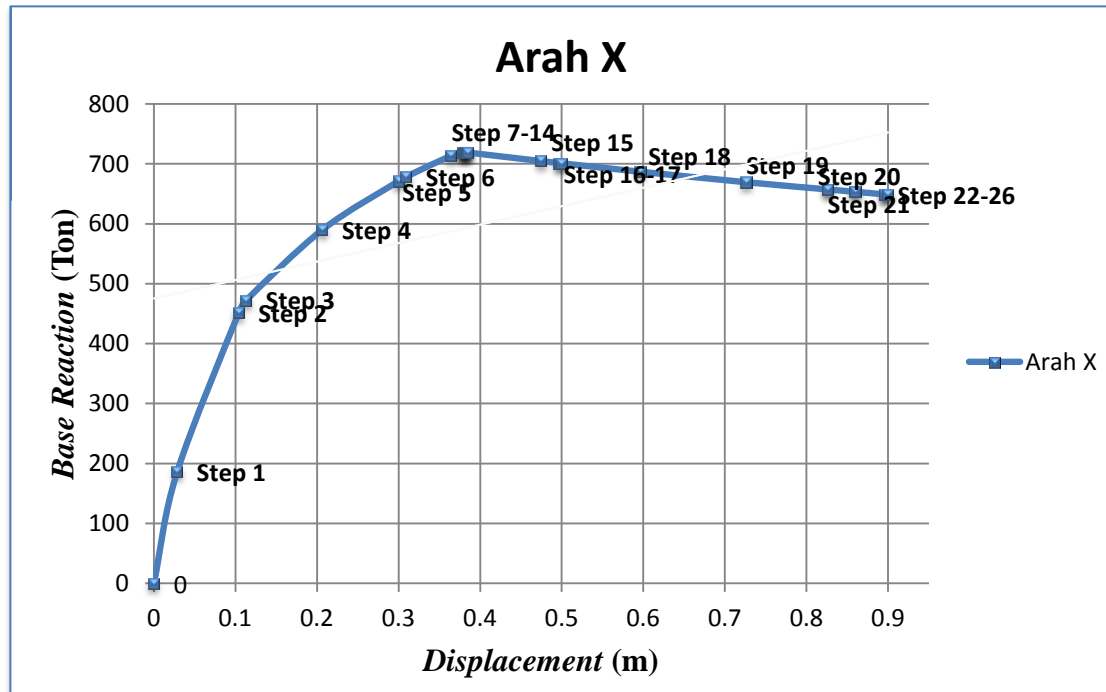


Gambar 5.36 Sendi plastis struktur gedung 1 arah Y

Sendi plastis pada gedung 1 arah Y pertama terjadi pada balok lantai 4 pada step ke-1 yang dapat terlihat pada Lampiran 15. Sendi plastis terbesar terjadi pada step ke-6 pada step ini sendi plastis juga sudah terjadi pada kolom lantai 1 dan bangunan juga sudah dalam kondisi keruntuhan (*collapse*) dapat terlihat pada Lampiran 17.

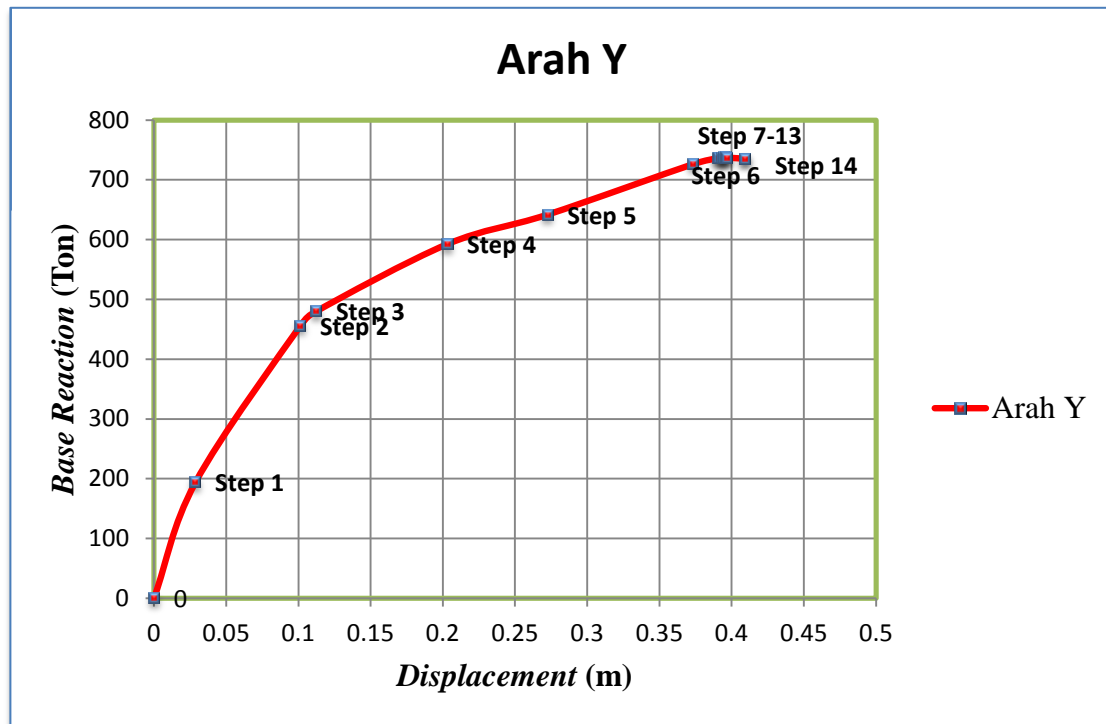
5.2.5 Sendi Plastis Gedung 2

Berikut adalah grafik hasil dari sendi plastis gedung 2 pada arah pembebanan X dan arah pembebanan Y.



Gambar 5.37 Sendi plastis struktur gedung 2 arah X

Sendi plastis pada gedung 2 arah X pertama terjadi balok lantai 2 dan lantai 3 yang terlihat pada Lampiran 18. Pada step ke-7 kolom lantai 3 sudah mengalami keruntuhan dan berlanjut sampai step ke-26 dimana bangunan benar-benar mengalami keruntuhan yang dapat terlihat pada Lampiran 30.



Gambar 5.38 Sendi plastis struktur gedung 2 arah Y

Sendi plastis pada gedung 2 arah Y pertama terjadi balok lantai 2 dan lantai 3 yang terlihat pada Lampiran 31. Pada step ke-7 kolom lantai 3 sudah mengalami keruntuhan dan berlanjut sampai step ke-14 dimana bangunan benar-benar mengalami keruntuhan yang dapat terlihat pada Lampiran 37.