

BAB III

ANALISIS STRUKTUR PORTAL 2 DIMENSI

3.1 Umum

Analisis struktur dari penulisan tugas akhir ini meliputi penelaahan struktur portal baja dengan pengaku (“Bracing”) dan struktur portal baja tanpa pengaku (“Unbracing”) ketika menerima beban lateral yang berupa beban gempa.

Dari berbagai jenis sistem pengaku yang telah banyak dikembangkan selama ini, sampai sekarang masih dilakukan penelitian-penelitian tentang perilaku dari sistem pengaku terhadap pengaruhnya dalam memberikan kontribusi kekakuan pada struktur gedung bertingkat banyak. Namun yang umum digunakan yaitu sistem pengaku penahan momen (“Momen Resisting Frame”), Sistem pengaku rangka diperkaku konsentrik (“Concentrically Braced Frame”), dan sistem pengaku rangka diperkaku eksentrik (“Eccentrically Braced Frame”).

Untuk mempelajari dari ketiga jenis sistem pengaku seperti tersebut di atas, maka dibuat model-model struktur portal baja dalam 2 dimensi yang mempunyai tinggi portal maksimum 39 m atau maksimum 10 tingkat dan memiliki 3 bentang serta pengaku ditempatkan pada tengah-tengah portal. Dimana dalam perencanaannya digunakan cara analisa beban statik ekuivalen, lalu melakukan

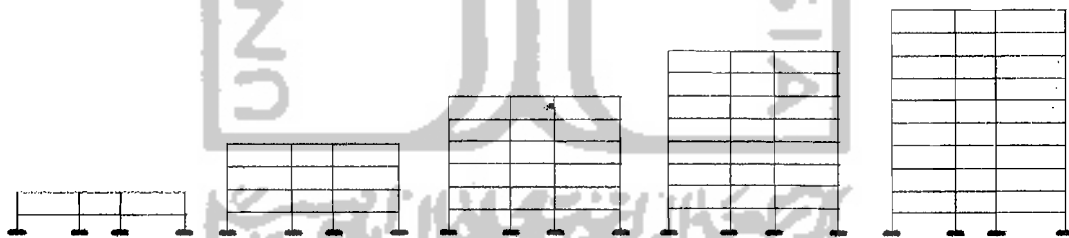
variasi perhitungan pada setiap kenaikan 2 tingkat dari struktur portal yang ditinjau untuk setiap model portal yang digunakan.

3.2 Model Struktur Portal Baja

Untuk mempelajari perilaku struktur portal baja dengan sistem pengaku maupun tanpa pengaku dalam menerima beban lateral, dipilih model-model struktur portal sebagai berikut.

3.2.1 Model struktur portal baja rangka penahan momen

Portal model ini tidak menggunakan pengaku (“Bracing”) tetapi dalam perencanaan pada titik-titik buhul struktur portal direncanakan sangat kaku, sehingga pada titik-titik buhul tersebut diharapkan mampu menahan beban lateral yang terjadi, lihat gambar 3.1.

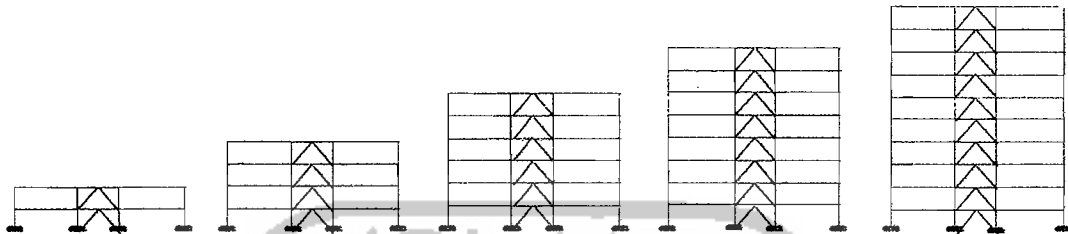


Gambar 3.1 Model struktur portal baja rangka penahan momen

3.2.2 Model struktur portal baja rangka diperkaku konsentrik

Model struktur portal baja yang digunakan dengan sistem pengaku ini menggunakan tipe V, dimana pengaku tersebut berada di tengah-tengah portal dan terdapat pada setiap tingkat. Sistem pengaku dengan tipe ini dapat memberikan

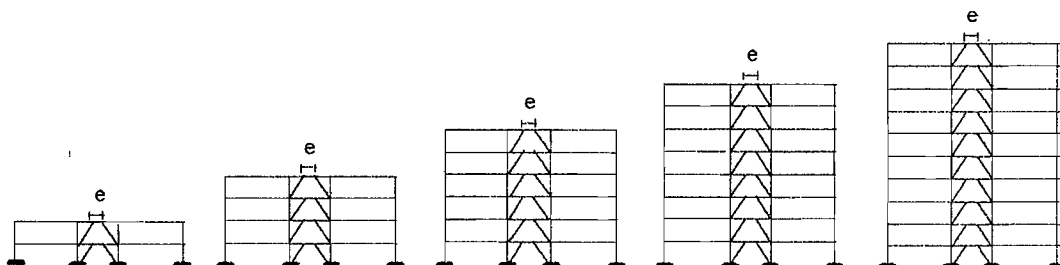
kekakuan portal yang lebih baik dari sistem pengaku rangka penahan momen, lihat gambar 3.2.



Gambar 3.2 Model struktur portal baja rangka diperkaku konsentrik

3.2.3 Model struktur portal baja rangka diperkaku eksentrik

Model struktur portal baja ini hampir sama dengan model struktur portal baja konsentrik tipe V, tetapi pada rangka diperkaku eksentrik batang-batang pengaku diletakkan dalam arah diagonal, dimana salah satu atau kedua ujung batang pengaku terletak pada suatu jarak tertentu dari titik pertemuan balok dan kolom. Eksentrisitas antara batang pengaku diambil dengan perbandingan e/I adalah lebih besar dari 5% (K.David,1988). Untuk sistem pengaku ini diambil besar eksentrisitas ($e = 120 \text{ cm}$), lihat gambar 3.3.



Gambar 3.3 Model struktur portal baja rangka diperkaku eksentrik

3.3 Pendimensionian Profil

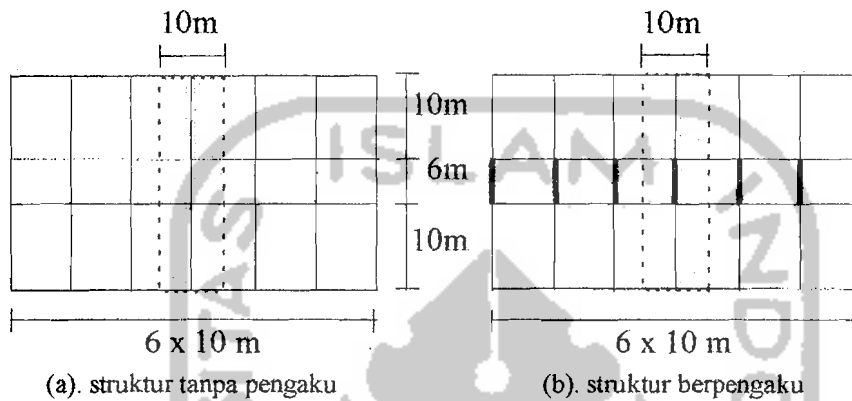
Pendimensionian profil dari struktur portal yang hendak ditinjau dalam studi literatur ini dilakukan dengan cara coba-coba ("Trial and Error"), yaitu dengan mencoba-coba dimensi profil dari masing-masing elemen struktur seperti elemen balok, kolom dan pengaku. Analisa dan perhitungan pendimensionian profil menggunakan paket program SAP⁹⁰ yang nantinya menghasilkan cek interaksi atau cek tegangan dari elemen-elemen struktur.

Langkah-langkah perhitungan pendimensionian profil adalah sebagai berikut :

- a. menghitung dimensi elemen-elemen struktur portal tanpa pengaku akibat beban gravitasi dengan variasi tingkat.
- b. menghitung dimensi elemen-elemen struktur portal rangka penahan momen akibat beban gravitasi dan beban gempa dengan variasi tingkat.
- c. menghitung dimensi elemen-elemen struktur portal rangka diperkaku konsentrik akibat beban gravitasi dan beban gempa, dimana beban gempa yang terjadi direncanakan sepenuhnya ditahan oleh bentang yang menggunakan pengaku ("Bracing") dengan variasi tingkat.
- d. menghitung dimensi elemen-elemen struktur portal rangka diperkaku eksentrik seperti pada langkah c.

3.4 Pembebanan Struktur Portal

Pembebanan struktur portal berdasarkan Peraturan Pembebanan Gedung Indonesia (PPGI, 1983) dan luas pembebanan seperti gambar 3.4 dibawah ini.



Gambar 3.4 Luas pembebanan pada struktur portal

3.4.1 Beban mati

a. beban mati atap

1. berat pelat (12 cm) $= 0,12 \cdot (24 \text{ KN/m}^3) \cdot 10 = 28,80 \text{ KN/m}$
2. berat plafond $= (0,11 \text{ KN/m}^2) \cdot 10 = 1,10 \text{ KN/m}$
3. berat finishing $= (0,17 \text{ KN/m}^2) \cdot 10 = 1,70 \text{ KN/m}$
4. berat balok taksiran $= 4,00 \text{ KN/m}$

Total beban mati atap

-----+
= 35,60 KN/m

b. beban mati lantai

1. berat pelat (12 cm) = $0,12 \cdot (24 \text{ KN/m}^3) \cdot 10 = 28,80 \text{ KN/m}$
 2. berat spesi (2 cm) = $\overset{0,02}{2} \cdot (0,21 \text{ KN/m}^2) \cdot 10 = 4,20 \text{ KN/m}$
 3. berat ubin (1 cm) = $1 \cdot (0,24 \text{ KN/m}^2) \cdot 10 = 2,40 \text{ KN/m}$
 4. berat pasir (1 cm) = $0,01 \cdot (16 \text{ KN/m}^2) \cdot 10 = 1,60 \text{ KN/m}$
 5. berat plafond = $(0,11 \text{ KN/m}^2) \cdot 10 = 1,10 \text{ KN/m}$
 6. berat dinding (50 % dari luas tingkat)
 $\overset{6,2991}{(3,9/2)} \cdot 2,5 = 4,875 \text{ KN/m}$
 7. berat balok taksiran = $5,00 \text{ KN/m}$
- +
 Total beban mati lantai = $47,975 \text{ KN/m}$

3.4.2 Beban hidup

a. beban hidup atap

1. beban hidup atap = $(1 \text{ KN/m}^2) \cdot 10 = 10,00 \text{ KN/m}$
 2. berat air hujan = $(10 \text{ KN/m}^2) \cdot 0,05 \cdot 10 = 5,00 \text{ KN/m}$
- +
 Total beban hidup atap = $15,00 \text{ KN/m}$

b. beban hidup lantai

1. beban hidup kantor = $(2,5 \text{ KN/m}^2) \cdot 10 = 25,00 \text{ KN/m}$

3.5 Perhitungan Berat Struktur Portal

A. Berat lantai atap (lantai 10)

$$1. \text{ berat lantai} = 35,60 \cdot 26 = 925,6 \text{ KN}$$

$$2. \text{ berat kolom taksiran} = 6 \cdot (3,9/2) \cdot 4 = 46,8 \text{ KN}$$

$$3. \text{ beban hidup (reduksi beban hidup perkantoran} = 0,3)$$

$$= 0,3 \cdot (15 \times 26) = 117 \text{ KN}$$

$$P_{10} = 1089,40 \text{ KN}$$

B. Berat lantai (9 s/d 2)

$$1. \text{ berat lantai} = 47,975 \cdot 26 = 1247,35 \text{ KN}$$

$$2. \text{ berat kolom taksiran} = 6 \cdot (3,9) \cdot 4 = 93,6 \text{ KN}$$

$$3. \text{ beban hidup (reduksi beban hidup perkantoran} = 0,3)$$

$$= 0,3 \cdot (25 \times 26) = 195 \text{ KN}$$

$$P(9 \text{ s/d } 2) = 1535,95 \text{ KN}$$

C. Berat lantai 1

$$1. \text{ berat lantai} = 47,975 \cdot 26 = 1247,35 \text{ KN}$$

$$2. \text{ berat kolom taksiran} = 6 \cdot (3,9/2 + 3,9) \cdot 4 = 140,40 \text{ KN}$$

$$3. \text{ beban hidup (reduksi beban hidup perkantoran} = 0,3)$$

$$= 0,3 \cdot (25 \times 26) = 195 \text{ KN}$$

$$P_1 = 1582,75 \text{ KN}$$

D. Berat pengaku (“bracing”)

Dari model struktur portal yang digunakan, pengaku konsentrik dan eksentrik mempunyai panjang pengaku mendekati sama dan berat pengaku taksiran = 3,0 KN/m, maka berat pengaku dapat dihitung sebagai berikut :

$$B_2 = 2 \cdot 2 \cdot 4,92 \cdot 3,0 = 59,04 \text{ KN}$$

$$B_4 = 2 \cdot 4 \cdot 4,92 \cdot 3,0 = 118,08 \text{ KN}$$

$$B_6 = 2 \cdot 6 \cdot 4,92 \cdot 3,0 = 177,12 \text{ KN}$$

$$B_8 = 2 \cdot 8 \cdot 4,92 \cdot 3,0 = 236,16 \text{ KN}$$

$$B_{10} = 2 \cdot 10 \cdot 4,92 \cdot 3,0 = 295,20 \text{ KN}$$

3.5.1 Berat struktur portal rangka penahan momen

$$W_2 = 1089,40 + 1582,75 = 2672,15 \text{ KN}$$

$$W_4 = 1089,40 + (2 \cdot 1535,95) + 1582,75 = 5744,05 \text{ KN}$$

$$W_6 = 1089,40 + (4 \cdot 1535,95) + 1582,75 = 8815,95 \text{ KN}$$

$$W_8 = 1089,40 + (6 \cdot 1535,95) + 1582,75 = 11887,85 \text{ KN}$$

$$W_{10} = 1089,40 + (8 \cdot 1535,95) + 1582,75 = 14959,75 \text{ KN}$$

3.5.2 Berat struktur portal rangka diperkaku konsentrik dan eksentrik

$$W_2 = 2672,15 + 59,04 = 2731,19 \text{ KN}$$

$$W_4 = 5744,05 + 118,08 = 5862,13 \text{ KN}$$

$$W_6 = 8815,95 + 177,12 = 8993,07 \text{ KN}$$

$$W_8 = 11887,85 + 236,16 = 12124,01 \text{ KN}$$

$$W_{10} = 14959,75 + 295,20 = 15254,95 \text{ KN}$$

3.6 Perhitungan Gaya Geser Dasar Horizontal Akibat Beban Gempa

Untuk perhitungan gaya geser dasar horizontal akibat beban gempa, dalam perencanaannya gedung dianggap berada pada daerah gempa wilayah I dan pada tanah keras. Perhitungan berdasarkan pada buku Pedoman Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Rumah dan Gedung (PPTGUG,1981) dan pembebanannya berdasarkan pada gambar 3.4 pada halaman 28, maka gaya geser dasar horizontal akibat beban gempa dapat dihitung sebagai berikut :

A. Waktu getar alami gedung.

Diketahui tinggi total gedung $H = 39$ m, lebar gedung $B = 26$ m dan rasio antara tinggi dengan lebar gedung $H/B = 1,5 < 3$, maka gaya geser dasar horizontal didistribusikan sepanjang tinggi gedung. Perhitungan waktu getar alami gedung dilakukan pada setiap kenaikan 2 tingkat tinggi gedung dengan rumus (2.1) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} T_{10} &= 0,085 \cdot H^{3/4} \\ &= 0,085 \cdot 39^{(3/4)} = 1,3265 \text{ detik} \end{aligned}$$

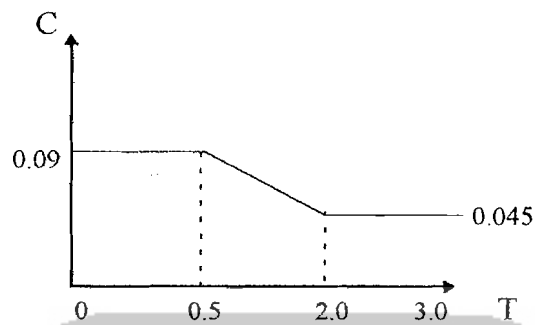
$$T_8 = 0,085 \cdot 31,2^{(3/4)} = 1,1221 \text{ detik}$$

$$T_6 = 0,085 \cdot 23,4^{(3/4)} = 0,9043 \text{ detik}$$

$$T_4 = 0,085 \cdot 15,6^{(3/4)} = 0,6672 \text{ detik}$$

$$T_2 = 0,085 \cdot 7,8^{(3/4)} = 0,3967 \text{ detik}$$

B. Gaya geser dasar horizontal akibat beban gempa



Gambar 3.5 Grafik daerah wilayah gempa I pada tanah keras

Untuk menentukan nilai koefisien gempa dasar pada setiap model portal yang digunakan dilakukan interpolasi berdasarkan gambar 3.5 tersebut diatas adalah sebagai berikut :

$$\frac{(0,09 - 0,045)}{1,5} \cdot x = \frac{(2 - 1,3265)}{1,5}$$

$$= 0,0202$$

$$C_{10} = 0,0202 + 0,045$$

$$= 0,0652$$

$$C_8 = 0,0713$$

$$C_6 = 0,0779$$

$$C_4 = 0,0850$$

$$C_2 = 0,090$$

Dari tabel 3.1 dan tabel 3.2 pada buku (PPTGUG,1981) halaman 14 - 15, untuk nilai K dan I didapatkan seperti di bawah ini:

$I = 1,0$: fungsi gedung sebagai perkantoran,

$K_1 = 1,0$: untuk portal baja tanpa pengaku,

$K_2 = 2,5$: untuk portal baja dengan pengaku.

Gaya geser dasar horizontal akibat beban gempa :

$$V = C \cdot I \cdot K \cdot W_t$$

3.6.1 Gaya geser dasar horizontal struktur portal rangka penahan momen akibat beban gempa

$$V_2 = 0,090 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 2672,15 = 240,494 \text{ KN}$$

$$V_4 = 0,0850 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 5744,05 = 488,244 \text{ KN}$$

$$V_6 = 0,0779 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 8815,95 = 686,763 \text{ KN}$$

$$V_8 = 0,0713 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 11887,85 = 847,604 \text{ KN}$$

$$V_{10} = 0,0652 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 14959,75 = 975,376 \text{ KN}$$

3.6.2 Gaya geser dasar horizontal struktur portal rangka diperkaku konsentrik dan eksentrik akibat beban gempa

$$V_2 = 0,090 \cdot 1,0 \cdot 2,5 \cdot 2731,19 = 614,518 \text{ KN}$$

$$V_4 = 0,0850 \cdot 1,0 \cdot 2,5 \cdot 5862,13 = 1245,703 \text{ KN}$$

$$V_6 = 0,0799 \cdot 1,0 \cdot 2,5 \cdot 8993,07 = 1796,366 \text{ KN}$$

$$V_8 = 0,0713 \cdot 1,0 \cdot 2,5 \cdot 12124,01 = 2161,105 \text{ KN}$$

$$V_{10} = 0,0652 \cdot 1,0 \cdot 2,5 \cdot 15254,95 = 2486,557 \text{ KN}$$

Tabel 3.1 Distribusi Gaya Geser Dasar Horizontal akibat Beban Gempa
Rangka Penahan Momen Model Struktur Portal 2 tingkat

Lantai	hi (m)	Wi (KN)	ΣWi.hi (KNm)	Fi (KN)	ΣFi (KN)	δi (cm)	ΣWi.δi ²	ΣFi.δi
Atap	7.8	1089.4	8497.320	139.301	139.301	1.185	1529.681	165.067
1	3.9	1582.75	6172.725	101.193	240.494	0.591	553.451	59.839
			14670.045				2083.132	224.906

$$T_2' = 6,3 \sqrt{\frac{\sum W_i \cdot \delta_i^2}{g \times \sum F_i \cdot \delta_i}} = 6,3 \sqrt{\frac{2083,132}{981 \times 224,906}} = 0,6122 \text{ dt}$$

$$T_2' > T_2 = 0,3967 \text{ dt}$$

Tabel 3.2 Distribusi Gaya Geser Dasar Horizontal akibat Beban Gempa
Rangka Penahan Momen Model Struktur Portal 4 tingkat

Lantai	hi (m)	Wi (KN)	ΣWi.hi (KNm)	Fi (KN)	ΣFi (KN)	δi (cm)	ΣWi.δi ²	ΣFi.δi
Atap	15.6	1089.4	16994.640	156.208	156.208	3.456	13008.379	539.786
3	11.7	1535.95	17970.615	165.179	321.387	2.871	12661.809	474.258
2	7.8	1535.95	11980.410	110.119	431.507	1.963	5919.890	216.188
1	3.9	1582.75	6172.725	56.737	488.244	0.827	1081.907	46.909
			53118.390				32671.983	1277.141

$$T_4' = 6,3 \sqrt{\frac{\sum W_i \cdot \delta_i^2}{g \times \sum F_i \cdot \delta_i}} = 6,3 \sqrt{\frac{32671,983}{981 \times 1277,141}} = 1,0174 \text{ dt}$$

$$T_4' > T_4 = 0,6672 \text{ dt}$$

Tabel 3.3 Distribusi Gaya Geser Dasar Horizontal akibat Beban Gempa
Rangka Penahan Momen Model Struktur Portal 6 tingkat

Lantai	hi (m)	Wi (KN)	ΣWi.hi (KNm)	Fi (KN)	ΣFi (KN)	δi (cm)	ΣWi.δi ²	ΣFi.δi
Atap	23.4	1089.4	25491.960	151.539	151.539	6.143	41106.282	930.861
5	19.5	1535.95	29951.025	178.046	329.585	5.520	46795.612	982.759
4	15.6	1535.95	23960.820	142.437	472.022	4.478	30794.962	637.785
3	11.7	1535.95	17970.615	106.828	578.850	3.412	17882.625	364.512
2	7.8	1535.95	11980.410	71.219	650.069	2.148	7089.403	153.006
1	3.9	1582.75	6172.725	36.694	686.763	0.836	1105.365	30.665
			115527.555				144774.250	3099.588

$$T_6' = 6,3 \sqrt{\frac{\sum W_i \cdot \delta_i^2}{g \times \sum F_i \cdot \delta_i}} = 6,3 \sqrt{\frac{144774,250}{981 \times 3099,588}} = 1,3747 \text{ dt}$$

$$T_6' > T_6 = 0,9043 \text{ dt}$$

Tabel 3.4 Distribusi Gaya Geser Dasar Horizontal akibat Beban Gempa
Rangka Penahan Momen Model Struktur Portal 8 tingkat

Lantai	hi (m)	Wi (KN)	ΣWi.hi (KNm)	Fi (KN)	ΣFi (KN)	δi (cm)	ΣWi.δi ²	ΣFi.δi
Atap	31.2	1089.4	33989.280	142.693	142.693	8.103	71533.176	1156.283
7	27.3	1535.95	41931.435	176.036	318.729	7.634	89504.711	1343.805
6	23.4	1535.95	35941.230	150.888	469.618	6.924	73636.643	1044.752
5	19.5	1535.95	29951.025	125.740	595.358	5.911	53668.308	743.266
4	15.6	1535.95	23960.820	100.592	695.950	4.631	32941.302	465.849
3	11.7	1535.95	17970.615	75.444	771.394	3.389	17637.548	255.656
2	7.8	1535.95	11980.410	50.296	821.690	2.056	6491.870	103.402
1	3.9	1582.75	6172.725	25.914	847.604	0.768	933.370	19.900
			201897.540				346346.929	5132.913

$$T_8' = 6,3 \sqrt{\frac{\sum W_i \cdot \delta_i^2}{g \times \sum F_i \cdot \delta_i}} = 6,3 \sqrt{\frac{346346,929}{981 \times 5132,913}} = 1,6523 \text{ dt}$$

$$T_8' > T_8 = 1,1221 \text{ dt}$$

Tabel 3.5 Distribusi Gaya Geser Dasar Horizontal akibat Beban Gempa
Rangka Penahan Momen Model Struktur Portal 10 tingkat

Lantai	hi (m)	Wi (KN)	ΣWi.hi (KNm)	Fi (KN)	ΣFi (KN)	δi (cm)	ΣWi.δi ²	ΣFi.δi
Atap	39.0	1089.4	42486.600	132.725	132.725	10.360	116929.387	1375.054
9	35.1	1535.95	53911.845	168.416	301.141	9.829	148378.755	1655.317
8	31.2	1535.95	47921.640	149.703	450.844	8.931	122518.948	1337.040
7	27.3	1535.95	41931.435	130.990	581.835	8.125	101388.274	1064.253
6	23.4	1535.95	35941.230	112.277	694.112	7.111	77658.891	798.362
5	19.5	1535.95	29951.025	93.565	787.677	5.909	53625.192	552.850
4	15.6	1535.95	23960.820	74.852	862.528	4.551	31814.140	340.661
3	11.7	1535.95	17970.615	56.139	918.667	3.266	16384.935	183.357
2	7.8	1535.95	11980.410	37.426	956.093	1.944	5803.725	72.751
1	3.9	1582.75	6172.725	19.283	975.376	0.709	796.389	13.678
			312228.345				675298.635	7393.323

$$T_{10}' = 6,3 \sqrt{\frac{\sum W_i \cdot \delta_i^2}{g \times \sum F_i \cdot \delta_i}} = 6,3 \sqrt{\frac{675298,635}{981 \times 7393,323}} = 1,9224 \text{ dt}$$

$$T_{10}' > T_{10} = 1,3265 \text{ dt}$$

Tabel 3.6 Distribusi Gaya Geser Dasar Horizontal akibat Beban Gempa
Rangka Diperkaku Konsentrik Model Struktur Portal 2 tingkat

Lantai	hi (m)	Wi (KN)	ΣWi.hi (KNm)	Fi (KN)	ΣFi (KN)	δi (cm)	ΣWi.δi ²	ΣFi.δi
Atap	7.8	1104.16	8612.448	353.828	353.828	0.520	298.993	184.122
1	3.9	1627.03	6345.417	260.690	614.518	0.266	115.271	69.388
			14957.865				414.263	253.510

$$T_2' = 6,3 \sqrt{\frac{\sum W_i \cdot \delta_i^2}{g \times \sum F_i \cdot \delta_i}} = 6,3 \sqrt{\frac{414,263}{981 \times 253,510}} = 0,2571 \text{ dt}$$

$$T_2 = 0,3967 \text{ dt}$$

$$80\% T_2 = 0,3174 \text{ dt}$$

$$T_2' < 80\% T_2 < 0,5 \text{ dt}$$

Tabel 3.7 Distribusi Gaya Geser Dasar Horizontal akibat Beban Gempa
Rangka Diperkaku Konsentrik Model Struktur Portal 4 tingkat

Lantai	hi (m)	Wi (KN)	ΣWi.hi (KNm)	Fi (KN)	ΣFi (KN)	δi (cm)	ΣWi.δi ²	ΣFi.δi
Atap	15.6	1104.16	17224.896	398.076	398.076	1.679	3111.103	668.202
3	11.7	1555.47	18198.999	420.588	818.665	1.269	2503.241	533.553
2	7.8	1555.47	12132.666	280.392	1099.057	0.783	952.734	219.443
1	3.9	1627.03	6345.417	146.646	1245.703	0.317	163.860	46.538
			53901.978				6730.938	1467.736

$$T_4' = 6,3 \sqrt{\frac{\sum W_i \cdot \delta_i^2}{g \times \sum F_i \cdot \delta_i}} = 6,3 \sqrt{\frac{6730,938}{981 \times 1467,736}} = 0,4307 \text{ dt}$$

$$T_4 = 0,6672 \text{ dt}$$

$$80\% T_4 = 0,5338 \text{ dt}$$

$$T_4' < 80\% T_4$$

Tabel 3.8 Distribusi Gaya Geser Dasar Horizontal akibat Beban Gempa
Rangka Diperkaku Konsentrik Model Struktur Portal 4 tingkat
(dengan waktu getar alami gedung $T_4' = 0,4307 \text{ dt}$)

Lantai	hi (m)	Wi (KN)	ΣWi.hi (KNm)	Fi (KN)	ΣFi (KN)	δi (cm)	ΣWi.δi ²	ΣFi.δi
Atap	15.6	1104.16	17224.896	421.492	421.492	1.705	3210.865	718.761
3	11.7	1555.47	18198.999	445.329	866.821	1.294	2605.917	576.409
2	7.8	1555.47	12132.666	296.886	1163.707	0.803	1003.859	238.504
1	3.9	1627.03	6345.417	155.272	1318.979	0.328	175.252	50.960
			53901.978				6995.892	1584.633

$$T_4'' = 6,3 \sqrt{\frac{\sum W_i \cdot \delta_i^2}{g \times \sum F_i \cdot \delta_i}} = 6,3 \sqrt{\frac{6995,892}{981 \times 1584,633}} = 0,4226 \text{ dt}$$

$$T_4'' \approx T_4' = 0,4307 \text{ dt}$$

Tabel 3.9 Distribusi Gaya Geser Dasar Horizontal akibat Beban Gempa
Rangka Diperkaku Konsentrik Model Struktur Portal 6 tingkat

Lantai	hi (m)	Wi (KN)	ΣWi.hi (KNm)	Fi (KN)	ΣFi (KN)	δi (cm)	ΣWi.δi ²	ΣFi.δi
Atap	23.4	1104.16	25837.344	390.361	390.361	3.778	15757.604	1474.672
5	19.5	1555.47	30331.665	458.263	848.624	3.032	14303.983	1389.672
4	15.6	1555.47	24265.332	366.610	1215.234	2.226	7704.237	815.903
3	11.7	1555.47	18198.999	274.958	1490.192	1.533	3653.176	421.377
2	7.8	1555.47	12132.666	183.305	1673.497	0.879	1203.043	161.207
1	3.9	1627.03	6345.417	95.869	1769.366	0.336	183.887	32.230
			117111.423				42805.928	4295.061

$$T_6' = 6,3 \sqrt{\frac{\sum W_i \cdot \delta_i^2}{g \times \sum F_i \cdot \delta_i}} = 6,3 \sqrt{\frac{42805,928}{981 \times 4295,061}} = 0,6350 \text{ dt}$$

$$T_6 = 0,9043 \text{ dt}$$

$$80\% T_6 = 0,7234 \text{ dt}$$

$$T_6' < 80\% T_6$$

Tabel 3.10 Distribusi Gaya Geser Dasar Horizontal akibat Beban Gempa
Rangka Diperkaku Konsentrik Model Struktur Portal 6 tingkat
(dengan waktu getar alami gedung $T_6' = 0,6350 \text{ dt}$)

Lantai	hi (m)	Wi (KN)	ΣWi.hi (KNm)	Fi (KN)	ΣFi (KN)	δi (cm)	ΣWi.δi ²	ΣFi.δi
Atap	23.4	1104.16	25837.344	426.575	426.575	3.850	16363.021	1642.144
5	19.5	1555.47	30331.665	500.776	927.351	3.110	15041.996	1557.275
4	15.6	1555.47	24265.332	400.621	1327.972	2.333	8465.828	934.625
3	11.7	1555.47	18198.999	300.466	1628.438	1.619	4075.569	486.361
2	7.8	1555.47	12132.666	200.310	1828.748	0.939	1371.854	180.116
1	3.9	1627.03	6345.417	104.763	1933.511	0.365	217.042	38.263
			117111.423				45535.310	4846.785

$$T_6'' = 6,3 \sqrt{\frac{\sum W_i \cdot \delta_i^2}{g \times \sum F_i \cdot \delta_i}} = 6,3 \sqrt{\frac{45535,310}{981 \times 4846,785}} = 0,6165 \text{ dt}$$

$$T_6'' \approx T_6' = 0,6350 \text{ dt}$$

Tabel 3.11 Distribusi Gaya Geser Dasar Horizontal akibat Beban Gempa
Rangka Diperkaku Konsentrik Model Struktur Portal 8 tingkat

Lantai	hi (m)	Wi (KN)	ΣWi.hi (KNm)	Fi (KN)	ΣFi (KN)	δi (cm)	ΣWi.δi ²	ΣFi.δi
Atap	31.2	1104.16	34449.792	363.903	363.903	6.813	51247.998	2479.183
7	27.3	1555.47	42464.331	448.563	812.467	5.785	52048.393	2594.757
6	23.4	1555.47	36397.998	384.483	1196.950	4.672	33954.623	1796.369
5	19.5	1555.47	30331.665	320.402	1517.352	3.553	19635.594	1138.379
4	15.6	1555.47	24265.332	256.322	1773.674	2.537	10012.543	650.320
3	11.7	1555.47	18198.999	192.241	1965.916	1.691	4450.282	325.170
2	7.8	1555.47	12132.666	128.161	2094.076	0.946	1391.261	121.207
1	3.9	1627.03	6345.417	67.029	2161.105	0.352	201.861	23.610
			204586.2				172942.554	9128.995

$$T_8' = 6,3 \sqrt{\frac{\sum W_i \cdot \delta_i^2}{g \times \sum F_i \cdot \delta_i}} = 6,3 \sqrt{\frac{172942,554}{981 \times 9128,995}} = 0,8755 \text{ dt}$$

$$T_8 = 1,1221 \text{ dt}$$

$$80\% T_8 = 0,8977 \text{ dt}$$

$$T_8' < 80\% T_8$$

Tabel 3.12 Distribusi Gaya Geser Dasar Horizontal akibat Beban Gempa
Rangka Diperkaku Konsentrik Model Struktur Portal 8 tingkat
(dengan waktu getar alami gedung $T_8' = 0,8755 \text{ dt}$)

Lantai	hi (m)	Wi (KN)	ΣWi.hi (KNm)	Fi (KN)	ΣFi (KN)	δi (cm)	ΣWi.δi ²	ΣFi.δi
Atap	31.2	1104.16	34449.792	401.672	401.672	6.809	51195.124	2735.079
7	27.3	1555.47	42464.331	495.118	896.790	5.798	52288.731	2870.661
6	23.4	1555.47	36397.998	424.387	1321.177	4.706	34450.686	1997.240
5	19.5	1555.47	30331.665	353.656	1674.833	3.613	20301.151	1277.848
4	15.6	1555.47	24265.332	282.925	1957.758	2.628	10745.940	743.640
3	11.7	1555.47	18198.999	212.194	2169.952	1.771	4881.368	375.901
2	7.8	1555.47	12132.666	141.462	2311.414	1.006	1574.041	142.304
1	3.9	1627.03	6345.417	73.985	2385.399	0.383	238.242	28.311
			204586.2				175675.283	10170.781

$$T_8'' = 6,3 \sqrt{\frac{\sum W_i \cdot \delta_i^2}{g \times \sum F_i \cdot \delta_i}} = 6,3 \sqrt{\frac{175675,283}{981 \times 10170,781}} = 0,8360 \text{ dt}$$

$$T_8' = 0,8755 \text{ dt}$$

$$80\% T_8' = 0,7004 \text{ dt}$$

$$T_8'' > 80\% T_8'$$

Tabel 3.13 Distribusi Gaya Geser Dasar Horizontal akibat Beban Gempa
Rangka Diperkaku Konsentrik Model Struktur Portal 10 tingkat

Lantai	hi (m)	Wi (KN)	ΣWi.hi (KNm)	Fi (KN)	ΣFi (KN)	δi (cm)	ΣWi.δi ²	ΣFi.δi
Atap	39.0	1104.16	43062.240	338.501	338.501	10.734	127223.358	3633.516
9	35.1	1555.47	54596.997	429.172	767.673	9.312	134881.497	3996.476
8	31.2	1555.47	48530.664	381.487	1149.160	7.825	95240.628	2985.105
7	27.3	1555.47	42464.331	333.801	1482.961	6.434	64398.626	2147.805
6	23.4	1555.47	36397.998	286.115	1769.076	5.072	40021.470	1451.297
5	19.5	1555.47	30331.665	238.429	2007.505	3.808	22560.034	908.026
4	15.6	1555.47	24265.332	190.743	2198.248	2.724	11541.970	519.587
3	11.7	1555.47	18198.999	143.057	2341.306	1.797	5022.379	257.060
2	7.8	1555.47	12132.666	95.372	2436.677	0.998	1549.819	95.198
1	3.9	1627.03	6345.417	49.880	2486.557	0.368	220.896	18.379
			316326.309				502660.678	16012.450

$$T_{10}' = 6,3 \sqrt{\frac{\sum W_i \cdot \delta_i^2}{g \times \sum F_i \cdot \delta_i}} = 6,3 \sqrt{\frac{502660,678}{981 \times 16012,450}} = 1,1270 \text{ dt}$$

$$T_{10} = 1,3265 \text{ dt}$$

$$80\% T_{10} = 1,0612 \text{ dt}$$

$$T_{10}' > 80\% T_{10}$$



Tabel 3.14 Distribusi Gaya Geser Dasar Horizontal akibat Beban Gempa
Rangka Diperkaku Eksentrik Model Struktur Portal 2 tingkat

Lantai	hi (m)	Wi (KN)	ΣWi.hi (KNm)	Fi (KN)	ΣFi (KN)	δi (cm)	ΣWi.δi ²	ΣFi.δi
Atap	7.8	1104.16	8612.448	353.828	353.828	1.086	1303.101	384.383
1	3.9	1627.03	6345.417	260.690	614.518	0.567	523.483	147.870
			14957.865				1826.584	532.253

$$T_2' = 6,3 \sqrt{\frac{\sum W_i \cdot \delta_i^2}{g \times \sum F_i \cdot \delta_i}} = 6,3 \sqrt{\frac{1826,584}{981 \times 532,253}} = 0,3726 \text{ dt}$$

$$T_2 = 0,3967 \text{ dt}$$

$$80\% T_2 = 0,3174 \text{ dt}$$

$$T_2' > 80\% T_2$$

Tabel 3.15 Distribusi Gaya Geser Dasar Horizontal akibat Beban Gempa
Rangka Diperkaku Eksentrik Model Struktur Portal 4 tingkat

Lantai	hi (m)	Wi (KN)	ΣWi.hi (KNm)	Fi (KN)	ΣFi (KN)	δi (cm)	ΣWi.δi ²	ΣFi.δi
Atap	15.6	1104.16	17224.896	398.076	398.076	2.682	7943.119	1067.692
3	11.7	1555.47	18198.999	420.588	818.665	2.033	6427.567	854.968
2	7.8	1555.47	12132.666	280.392	1099.057	1.329	2745.357	372.507
1	3.9	1627.03	6345.417	146.646	1245.703	0.574	535.606	84.139
			53901.978				17651.650	2379.306

$$T_4' = 6,3 \sqrt{\frac{\sum W_i \cdot \delta_i^2}{g \times \sum F_i \cdot \delta_i}} = 6,3 \sqrt{\frac{17651,650}{981 \times 2379,306}} = 0,5479 \text{ dt}$$

$$T_4 = 0,6672 \text{ dt}$$

$$80\% T_4 = 0,5338 \text{ dt}$$

$$T_4' \approx 80\% T_4$$

Tabel 3.16 Distribusi Gaya Geser Dasar Horizontal akibat Beban Gempa
Rangka Diperkaku Eksentrik Model Struktur Portal 6 tingkat

Lantai	hi (m)	Wi (KN)	ΣWi.hi (KNm)	Fi (KN)	ΣFi (KN)	δi (cm)	ΣWi.δi ²	ΣFi.δi
Atap	23.4	1104.16	25837.344	396.318	396.318	4.987	27455.728	1976.259
5	19.5	1555.47	30331.665	465.256	861.573	3.907	24727.052	1855.014
4	15.6	1555.47	24265.332	372.205	1233.778	3.069	14649.055	1142.236
3	11.7	1555.47	18198.999	279.153	1512.932	2.204	7553.812	615.170
2	7.8	1555.47	12132.666	186.102	1699.034	1.333	2763.612	248.062
1	3.9	1627.03	6345.417	97.332	1796.366	0.536	467.366	52.166
			117111.423				77616.624	5888.907

$$T_6' = 6,3 \sqrt{\frac{\sum W_i \cdot \delta_i^2}{g \times \sum F_i \cdot \delta_i}} = 6,3 \sqrt{\frac{77616,624}{981 \times 5888,907}} = 0,7302 \text{ dt}$$

$$T_6 = 0,9043 \text{ dt}$$

$$80\% T_6 = 0,7234 \text{ dt}$$

$$T_6' \approx 80\% T_6$$

Tabel 3.17 Distribusi Gaya Geser Dasar Horizontal akibat Beban Gempa
Rangka Diperkaku Eksentrik Model Struktur Portal 8 tingkat

Lantai	hi (m)	Wi (KN)	ΣWi.hi (KNm)	Fi (KN)	ΣFi (KN)	δi (cm)	ΣWi.δi ²	ΣFi.δi
Atap	31.2	1104.16	34449.792	363.903	363.903	7.765	66570.758	2825.608
7	27.3	1555.47	42464.331	448.563	812.467	6.569	67122.647	2946.643
6	23.4	1555.47	36397.998	384.483	1196.950	5.442	46058.170	2092.182
5	19.5	1555.47	30331.665	320.402	1517.352	4.269	28350.933	1367.882
4	15.6	1555.47	24265.332	256.322	1773.674	3.180	15729.849	815.112
3	11.7	1555.47	18198.999	192.241	1965.916	2.197	7509.421	422.396
2	7.8	1555.47	12132.666	128.161	2094.076	1.284	2564.650	164.566
1	3.9	1627.03	6345.417	67.029	2161.105	0.496	400.667	33.262
			204586.200				234307.094	10667.651

$$T_8' = 6,3 \sqrt{\frac{\sum W_i \cdot \delta_i^2}{g \times \sum F_i \cdot \delta_i}} = 6,3 \sqrt{\frac{234307,094}{981 \times 10667,651}} = 0,9427 \text{ dt}$$

$$T_8 = 1,1221 \text{ dt}$$

$$80\% T_8 = 0,8977 \text{ dt}$$

$$T_8' > 80\% T_8$$

Tabel 3.18 Distribusi Gaya Geser Dasar Horizontal akibat Beban Gempa
Rangka Diperkaku Eksentrik Model Struktur Portal 10 tingkat

Lantai	hi (m)	Wi (KN)	ΣWi.hi (KNm)	Fi (KN)	ΣFi (KN)	δi (cm)	ΣWi.δi ²	ΣFi.δi
Atap	39.0	1104.16	43062.240	338.501	338.501	11.490	145778.529	3889.470
9	35.1	1555.47	54596.997	429.172	767.673	9.852	150965.658	4228.050
8	31.2	1555.47	48530.664	381.487	1149.160	8.384	109347.222	3198.544
7	27.3	1555.47	42464.331	333.801	1482.961	7.014	76528.787	2341.364
6	23.4	1555.47	36397.998	286.115	1769.076	5.636	49411.899	1612.596
5	19.5	1555.47	30331.665	238.429	2007.505	4.322	29053.953	1030.460
4	15.6	1555.47	24265.332	190.743	2198.248	3.166	15591.273	603.892
3	11.7	1555.47	18198.999	143.057	2341.306	2.146	7161.347	306.957
2	7.8	1555.47	12132.666	95.372	2436.677	1.230	2352.872	117.297
1	3.9	1627.03	6345.417	49.880	2486.557	0.462	347.147	23.040
			316326.309				586538.687	17351.670

$$T_{10}' = 6,3 \sqrt{\frac{\sum W_i \cdot \delta_i^2}{g \times \sum F_i \cdot \delta_i}} = 6,3 \sqrt{\frac{586538,687}{981 \times 17351,670}} = 1,1695 \text{ dt}$$

$$T_{10} = 1,3265 \text{ dt}$$

$$80\% T_{10} = 1,0612 \text{ dt}$$

$$T_{10}' > 80\% T_{10}$$

3.7 Perhitungan Kekakuan Tingkat Struktur Portal

3.7.1 Kekakuan tingkat struktur portal rangka penahan momen

A. Portal 2 tingkat

1. $F = 1$ unit di tingkat 1 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{11} = 2,1058 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{21} = 2,7157 \cdot 10^{-3}$$

2. $F = 1$ unit di tingkat 2 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{12} = 2,7157 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{22} = 6,5340 \cdot 10^{-3}$$

sehingga dapat dituliskan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$[\delta] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 2,1058 & 2,7157 \\ 2,7157 & 6,5340 \end{bmatrix}$$

setelah di inverse diperoleh matrik kekakuan tingkat sebagai berikut :

$$[K] = 10^3 \cdot \begin{bmatrix} 1,0235 & -0,4254 \\ -0,4254 & 0,3298 \end{bmatrix}$$

lalu didapatkan nilai kekakuan pada tiap tingkat sebagai berikut :

$$K_2 = k_{22} = 329,8 \text{ KN/cm}$$

$$K_1 = k_{11} - K_2 = 1023,5 - 329,8 \Rightarrow K_1 = 639,7 \text{ KN/cm}$$

B. Portal 4 tingkat

1. $F = 1$ unit di tingkat 1 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{11} = 1,2779 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{21} = 1,6959 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{31} = 1,7598 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{41} = 1,7724 \cdot 10^{-3}$$

2. $F = 1$ unit di tingkat 2 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{12} = 1,6959 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{22} = 3,8737 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{32} = 4,4327 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{42} = 4,5343 \cdot 10^{-3}$$

3. $F = 1$ unit di tingkat 3 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{13} = 1,7598 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{23} = 4,4327 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{33} = 6,7766 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{43} = 7,4510 \cdot 10^{-3}$$

4. $F = 1$ unit di tingkat 4 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{14} = 1,7724 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{24} = 4,5343 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{34} = 7,4510 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{44} = 10,4030 \cdot 10^{-3}$$

sehingga dapat dituliskan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$[\delta] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 1,2779 & 1,6959 & 1,7598 & 1,7724 \\ 1,6959 & 3,8737 & 4,4327 & 4,5343 \\ 1,7598 & 4,4327 & 6,7766 & 7,4510 \\ 1,7724 & 4,5343 & 7,4510 & 10,4030 \end{bmatrix}$$

setelah di inverse diperoleh matrik kekakuan tingkat sebagai berikut :

$$[K] = 10^3 \cdot \begin{bmatrix} 1,9384 & -1,0928 & 0,2393 & -0,0253 \\ -1,0928 & 1,7007 & -1,0275 & 0,1809 \\ 0,2393 & -1,0275 & 1,4586 & -0,6376 \\ -0,0253 & 0,1809 & -0,6376 & 0,4783 \end{bmatrix}$$

lalu didapatkan nilai kekakuan pada tiap tingkat sebagai berikut :

$$K_4 = k_{44} = 478,3 \text{ KN/cm}$$

$$K_3 = k_{33} - K_4 = 1458,6 - 478,3 \Rightarrow K_3 = 980,3 \text{ KN/cm}$$

$$K_2 = k_{22} - K_3 = 1700,7 - 980,3 \Rightarrow K_2 = 720,4 \text{ KN/cm}$$

$$K_1 = k_{11} - K_2 = 1938,4 - 720,4 \Rightarrow K_1 = 1218 \text{ KN/cm}$$

C. Portal 6 tingkat

1. $F = 1$ unit di tingkat 1 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{11} = 0,8371 \cdot 10^{-3} & \delta_{21} = 1,1694 \cdot 10^{-3} & \delta_{31} = 1,2339 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{41} = 1,2471 \cdot 10^{-3} & \delta_{51} = 1,2505 \cdot 10^{-3} & \delta_{61} = 1,2516 \cdot 10^{-3} \end{array}$$

2. $F = 1$ unit di tingkat 2 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{12} = 1,1694 \cdot 10^{-3} & \delta_{22} = 2,7357 \cdot 10^{-3} & \delta_{32} = 3,2096 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{42} = 3,3049 \cdot 10^{-3} & \delta_{52} = 3,3261 \cdot 10^{-3} & \delta_{62} = 3,3312 \cdot 10^{-3} \end{array}$$

3. $F = 1$ unit di tingkat 3 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{13} = 1,2339 \cdot 10^{-3} & \delta_{23} = 3,2096 \cdot 10^{-3} & \delta_{33} = 4,9357 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{43} = 5,4531 \cdot 10^{-3} & \delta_{53} = 5,5575 \cdot 10^{-3} & \delta_{63} = 5,5752 \cdot 10^{-3} \end{array}$$

4. $F = 1$ unit di tingkat 4 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{14} = 1,2471 \cdot 10^{-3} & \delta_{24} = 3,3049 \cdot 10^{-3} & \delta_{34} = 5,4531 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{44} = 7,2654 \cdot 10^{-3} & \delta_{54} = 7,7936 \cdot 10^{-3} & \delta_{64} = 7,8627 \cdot 10^{-3} \end{array}$$

5. $F = 1$ unit di tingkat 5 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{15} = 1,2505 \cdot 10^{-3} & \delta_{25} = 3,3261 \cdot 10^{-3} & \delta_{35} = 5,5575 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{45} = 7,7936 \cdot 10^{-3} & \delta_{55} = 10,4601 \cdot 10^{-3} & \delta_{65} = 11,0254 \cdot 10^{-3} \end{array}$$

6. $F = 1$ unit di tingkat 6 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{16} = 1,2516 \cdot 10^{-3} & \delta_{26} = 3,3312 \cdot 10^{-3} & \delta_{36} = 5,5752 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{46} = 7,8627 \cdot 10^{-3} & \delta_{56} = 11,0254 \cdot 10^{-3} & \delta_{66} = 14,3926 \cdot 10^{-3} \end{array}$$



sehingga dapat dituliskan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$[\delta] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0,8371 & 1,1694 & 1,2339 & 1,2471 & 1,2505 & 1,2516 \\ 1,1694 & 2,7357 & 3,2096 & 3,3049 & 3,3261 & 3,3312 \\ 1,2339 & 3,2096 & 4,9357 & 5,4530 & 5,5575 & 5,5752 \\ 1,2471 & 3,3049 & 5,4531 & 7,2654 & 7,7936 & 7,8627 \\ 1,2505 & 3,3261 & 5,5575 & 7,7936 & 10,4601 & 11,0254 \\ 1,2516 & 3,3312 & 5,5752 & 7,8627 & 11,0254 & 14,3926 \end{bmatrix}$$

setelah di inverse diperoleh matrik kekakuan tingkat sebagai berikut :

$$[K] = 10^3 \cdot \begin{bmatrix} 3,1194 & -1,7860 & 0,4443 & -0,0620 & 0,0055 & -0,0003 \\ -1,7860 & 2,6862 & -1,7033 & 0,3969 & -0,0348 & 0,0032 \\ 0,4443 & -1,7033 & 2,5724 & -1,4496 & 0,2214 & -0,0185 \\ -0,0620 & 0,3969 & -1,4496 & 1,8036 & -0,8030 & 0,1048 \\ 0,0055 & -0,0348 & 0,2214 & -0,8030 & 1,0735 & -0,4618 \\ -0,0003 & 0,0032 & -0,0185 & 0,1048 & -0,4618 & 0,3725 \end{bmatrix}$$

lalu didapatkan nilai kekakuan pada tiap tingkat sebagai berikut :

$$K_6 = k_{66} = 372,5 \text{ KN/cm}$$

$$K_5 = k_{55} - K_6 = 1073,5 - 372,5 \Rightarrow K_5 = 701 \text{ KN/cm}$$

$$K_4 = k_{44} - K_5 = 1803,6 - 701 \Rightarrow K_4 = 1102,6 \text{ KN/cm}$$

$$K_3 = k_{33} - K_4 = 2572,4 - 1102,6 \Rightarrow K_3 = 1469,8 \text{ KN/cm}$$

$$K_2 = k_{22} - K_3 = 2686,2 - 1469,8 \Rightarrow K_2 = 1216,4 \text{ KN/cm}$$

$$K_1 = k_{11} - K_2 = 3119,4 - 1216,4 \Rightarrow K_1 = 1903 \text{ KN/cm}$$

D. Portal 8 tingkat

1. $F = 1$ unit di tingkat 1 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{11} = 0,5858 \cdot 10^{-3} & \delta_{21} = 0,8439 \cdot 10^{-3} & \delta_{31} = 0,9039 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{41} = 0,9182 \cdot 10^{-3} & \delta_{51} = 0,9222 \cdot 10^{-3} & \delta_{61} = 0,9233 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{71} = 0,9239 \cdot 10^{-3} & \delta_{81} = 0,9244 \cdot 10^{-3} & \end{array}$$

2. $F = 1$ unit di tingkat 2 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{12} = 0,8439 \cdot 10^{-3} & \delta_{22} = 2,0059 \cdot 10^{-3} & \delta_{32} = 2,3976 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{42} = 2,4918 \cdot 10^{-3} & \delta_{52} = 2,5153 \cdot 10^{-3} & \delta_{62} = 2,5210 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{72} = 2,5244 \cdot 10^{-3} & \delta_{82} = 2,5267 \cdot 10^{-3} & \end{array}$$

3. $F = 1$ unit di tingkat 3 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{13} = 0,9039 \cdot 10^{-3} & \delta_{23} = 2,3976 \cdot 10^{-3} & \delta_{33} = 3,7132 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{43} = 4,1517 \cdot 10^{-3} & \delta_{53} = 4,2562 \cdot 10^{-3} & \delta_{63} = 4,2762 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{73} = 4,2842 \cdot 10^{-3} & \delta_{83} = 4,2911 \cdot 10^{-3} & \end{array}$$

4. $F = 1$ unit di tingkat 4 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{14} = 0,9182 \cdot 10^{-3} & \delta_{24} = 2,4918 \cdot 10^{-3} & \delta_{34} = 4,1517 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{44} = 5,5456 \cdot 10^{-3} & \delta_{54} = 5,9944 \cdot 10^{-3} & \delta_{64} = 6,0669 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{74} = 6,0869 \cdot 10^{-3} & \delta_{84} = 6,0994 \cdot 10^{-3} & \end{array}$$

5. $F = 1$ unit di tingkat 5 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{15} = 0,9222 \cdot 10^{-3} & \delta_{25} = 2,5153 \cdot 10^{-3} & \delta_{35} = 4,2562 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{45} = 5,9944 \cdot 10^{-3} & \delta_{55} = 7,7433 \cdot 10^{-3} & \delta_{65} = 8,1670 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{75} = 8,2418 \cdot 10^{-3} & \delta_{85} = 8,2692 \cdot 10^{-3} & \end{array}$$

6. $F = 1$ unit di tingkat 6 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{16} &= 0,9233 \cdot 10^{-3} & \delta_{26} &= 2,5210 \cdot 10^{-3} & \delta_{36} &= 4,2762 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{46} &= 6,0699 \cdot 10^{-3} & \delta_{56} &= 8,1670 \cdot 10^{-3} & \delta_{66} &= 9,9257 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{76} &= 10,3597 \cdot 10^{-3} & \delta_{86} &= 10,456710^{-3} \end{aligned}$$

7. $F = 1$ unit di tingkat 7 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{17} &= 0,9239 \cdot 10^{-3} & \delta_{27} &= 2,5244 \cdot 10^{-3} & \delta_{37} &= 4,2842 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{47} &= 6,0869 \cdot 10^{-3} & \delta_{57} &= 8,2418 \cdot 10^{-3} & \delta_{67} &= 10,3597 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{77} &= 12,1440 \cdot 10^{-3} & \delta_{87} &= 12,6853 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

8. $F = 1$ unit di tingkat 8 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{18} &= 0,9244 \cdot 10^{-3} & \delta_{28} &= 2,5267 \cdot 10^{-3} & \delta_{38} &= 4,2911 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{48} &= 6,0994 \cdot 10^{-3} & \delta_{58} &= 8,2692 \cdot 10^{-3} & \delta_{68} &= 10,4567 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{78} &= 12,6853 \cdot 10^{-3} & \delta_{88} &= 15,1680 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

sehingga dapat dituliskan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$[\delta] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0,5858 & 0,8439 & 0,9039 & 0,9182 & 0,9222 & 0,9233 & 0,9239 & 0,9244 \\ 0,8439 & 2,0059 & 2,3976 & 2,4918 & 2,5153 & 2,5210 & 2,5244 & 2,5267 \\ 0,9039 & 2,3976 & 3,7132 & 4,1517 & 4,2562 & 4,2762 & 4,2842 & 4,2911 \\ 0,9182 & 2,4918 & 4,1517 & 5,5456 & 5,9944 & 6,0669 & 6,0869 & 6,0994 \\ 0,9222 & 2,5153 & 4,2562 & 5,9944 & 7,7433 & 8,1670 & 8,2418 & 8,2692 \\ 0,9233 & 2,5210 & 4,2762 & 6,0669 & 8,1670 & 9,9257 & 10,3597 & 10,4567 \\ 0,9239 & 2,5244 & 4,2842 & 6,0869 & 8,2418 & 10,3597 & 12,1440 & 12,6853 \\ 0,9244 & 2,5267 & 4,2911 & 6,0994 & 8,2692 & 10,4567 & 12,6853 & 15,1680 \end{bmatrix}$$

setelah di inverse diperoleh matrik kekakuan tingkat sebagai berikut :

$$[K] = 10^3 \cdot \begin{bmatrix} 4,5971 & -2,6484 & 0,6875 & -0,0949 & 0,0089 & -0,0020 & 0,0018 & -0,0003 \\ -2,6484 & 3,9198 & -2,5217 & 0,6281 & -0,0647 & 0,0070 & -0,0024 & 0,0017 \\ 0,6875 & -2,5218 & 3,7695 & -2,2184 & 0,4286 & -0,0457 & 0,0028 & -0,0007 \\ -0,0950 & 0,6286 & -2,2200 & 2,9246 & -1,5211 & 0,2986 & -0,0315 & 0,0029 \\ 0,0093 & -0,0672 & 0,4374 & -1,5317 & 2,2550 & -1,3568 & 0,2816 & -0,0267 \\ -0,0026 & 0,0111 & -0,0602 & 0,3175 & -1,3655 & 2,1909 & -1,3041 & 0,2124 \\ 0,0022 & -0,0048 & 0,0115 & -0,0429 & 0,2874 & -1,3051 & 1,7993 & -0,7471 \\ -0,0004 & 0,0021 & -0,0021 & 0,0047 & -0,0277 & 0,2125 & -0,7471 & 0,5577 \end{bmatrix}$$

lalu didapatkan nilai kekakuan pada tiap tingkat sebagai berikut :

$$K_8 = k_{88} = 557,7 \text{ KN/cm}$$

$$K_7 = k_{77} - K_8 = 1799,3 - 557,7 \Rightarrow K_7 = 1241,6 \text{ KN/cm}$$

$$K_6 = k_{66} - K_7 = 2190,9 - 1241,6 \Rightarrow K_6 = 949,3 \text{ KN/cm}$$

$$K_5 = k_{55} - K_6 = 2255 - 949,3 \Rightarrow K_5 = 1305,7 \text{ KN/cm}$$

$$K_4 = k_{44} - K_5 = 2924,6 - 1305,7 \Rightarrow K_4 = 1618,9 \text{ KN/cm}$$

$$K_3 = k_{33} - K_4 = 3769,5 - 1618,9 \Rightarrow K_3 = 2150,6 \text{ KN/cm}$$

$$K_2 = k_{22} - K_3 = 3919,8 - 2150,6 \Rightarrow K_2 = 1769,2 \text{ KN/cm}$$

$$K_1 = k_{11} - K_2 = 4597,1 - 1769,2 \Rightarrow K_1 = 2827,9 \text{ KN/cm}$$

E. Portal 10 tingkat

1. $F = 1$ unit di tingkat 1 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{11} = 0,4511 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{21} = 0,6635 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{31} = 0,7172 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{41} = 0,7315 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{51} = 0,7354 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{61} = 0,7366 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{71} = 0,7370 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{81} = 0,7377 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{91} = 0,7383 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{101} = 0,7389 \cdot 10^{-3}$$

2. $F = 1$ unit di tingkat 2 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{12} = 0,6635 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{22} = 1,5937 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{32} = 1,9277 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{42} = 2,0145 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{52} = 2,0379 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{62} = 2,0436 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{72} = 2,0459 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{82} = 2,0482 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{92} = 2,0505 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{102} = 2,0527 \cdot 10^{-3}$$

3. $F = 1$ unit di tingkat 3 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{13} = 0,7172 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{23} = 1,9277 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{33} = 2,9978 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{43} = 3,3763 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{53} = 3,4740 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{63} = 3,4945 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{73} = 3,5014 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{83} = 3,5071 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{93} = 3,5117 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{103} = 3,5162 \cdot 10^{-3}$$

4. $F = 1$ unit di tingkat 4 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{14} = 0,7315 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{24} = 2,0145 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{34} = 3,3763 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{44} = 4,5172 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{54} = 4,9066 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{64} = 4,9785 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{74} = 4,9974 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{84} = 5,0077 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{94} = 5,0162 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{104} = 5,0248 \cdot 10^{-3}$$

5. $F = 1$ unit di tingkat 5 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{15} &= 0,7354 \cdot 10^{-3} & \delta_{25} &= 2,0379 \cdot 10^{-3} & \delta_{35} &= 3,4740 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{45} &= 4,9066 \cdot 10^{-3} & \delta_{55} &= 6,2736 \cdot 10^{-3} & \delta_{65} &= 6,6419 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{75} &= 6,7144 \cdot 10^{-3} & \delta_{85} &= 6,7378 \cdot 10^{-3} & \delta_{95} &= 6,7526 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{105} &= 6,7658 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

6. $F = 1$ unit di tingkat 6 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{16} &= 0,7366 \cdot 10^{-3} & \delta_{26} &= 2,0436 \cdot 10^{-3} & \delta_{36} &= 3,4945 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{46} &= 4,9785 \cdot 10^{-3} & \delta_{56} &= 6,6419 \cdot 10^{-3} & \delta_{66} &= 8,0157 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{76} &= 8,3908 \cdot 10^{-3} & \delta_{86} &= 8,4708 \cdot 10^{-3} & \delta_{96} &= 8,5005 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{106} &= 8,5210 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

7. $F = 1$ unit di tingkat 7 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{17} &= 0,7372 \cdot 10^{-3} & \delta_{27} &= 2,0459 \cdot 10^{-3} & \delta_{37} &= 3,5014 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{47} &= 4,9974 \cdot 10^{-3} & \delta_{57} &= 6,7144 \cdot 10^{-3} & \delta_{67} &= 8,3908 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{77} &= 9,7744 \cdot 10^{-3} & \delta_{87} &= 10,1632 \cdot 10^{-3} & \delta_{97} &= 10,2512 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{107} &= 10,2831 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

8. $F = 1$ unit di tingkat 8 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{18} &= 0,7377 \cdot 10^{-3} & \delta_{28} &= 2,0482 \cdot 10^{-3} & \delta_{38} &= 3,5071 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{48} &= 5,0077 \cdot 10^{-3} & \delta_{58} &= 6,7378 \cdot 10^{-3} & \delta_{68} &= 8,4708 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{78} &= 10,1632 \cdot 10^{-3} & \delta_{88} &= 11,5953 \cdot 10^{-3} & \delta_{98} &= 11,9939 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{108} &= 12,0572 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

9. $F = 1$ unit di tingkat 9 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{19} &= 0,7383 \cdot 10^{-3} & \delta_{29} &= 2,0505 \cdot 10^{-3} & \delta_{39} &= 3,5117 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{49} &= 5,0162 \cdot 10^{-3} & \delta_{59} &= 6,7526 \cdot 10^{-3} & \delta_{69} &= 8,5005 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{79} &= 10,2512 \cdot 10^{-3} & \delta_{89} &= 11,9939 \cdot 10^{-3} & \delta_{99} &= 14,5571 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{109} &= 14,9870 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

10. $F = 1$ unit di tingkat 10 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{110} &= 0,7389 \cdot 10^{-3} & \delta_{210} &= 2,0527 \cdot 10^{-3} & \delta_{310} &= 3,5162 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{410} &= 5,0248 \cdot 10^{-3} & \delta_{510} &= 6,7658 \cdot 10^{-3} & \delta_{610} &= 8,5210 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{710} &= 10,2831 \cdot 10^{-3} & \delta_{810} &= 12,0572 \cdot 10^{-3} & \delta_{910} &= 14,9870 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{1010} &= 18,3080 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

sehingga dapat dituliskan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$[\delta] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0,4511 & 0,6635 & 0,7172 & 0,7315 & 0,7354 & 0,7366 & 0,7372 & 0,7377 & 0,7383 & 0,7389 \\ 0,6635 & 1,5937 & 1,9277 & 2,0145 & 2,0379 & 2,0436 & 2,0459 & 2,0482 & 2,0505 & 2,0527 \\ 0,7172 & 1,9277 & 2,9978 & 3,3763 & 3,4740 & 3,4945 & 3,5014 & 3,5071 & 3,5117 & 3,5162 \\ 0,7315 & 2,0145 & 3,3763 & 4,5172 & 4,9066 & 4,9785 & 4,9974 & 5,0077 & 5,0162 & 5,0248 \\ 0,7354 & 2,0379 & 3,4740 & 4,9066 & 6,2736 & 6,6419 & 6,7144 & 6,7378 & 6,7526 & 6,7658 \\ 0,7366 & 2,0436 & 3,4945 & 4,9785 & 6,6419 & 9,0157 & 8,3908 & 8,4708 & 8,5005 & 8,5210 \\ 0,7370 & 2,0459 & 3,5014 & 4,9974 & 6,7144 & 8,3908 & 9,7744 & 10,1632 & 10,2512 & 10,2831 \\ 0,7377 & 2,0482 & 3,5071 & 5,0077 & 6,7378 & 8,4708 & 10,1632 & 11,5953 & 11,9939 & 12,0572 \\ 0,7383 & 2,0505 & 3,5117 & 5,0162 & 6,7526 & 8,5005 & 10,2512 & 11,9939 & 14,5571 & 14,9870 \\ 0,7389 & 2,0527 & 3,5162 & 5,0248 & 6,7658 & 8,5210 & 10,2831 & 12,0572 & 14,9870 & 18,3080 \end{bmatrix}$$

setelah di inverse diperoleh matrik kekakuan tingkat sebagai berikut :

$$[K] = 10^3 \cdot \begin{bmatrix} 6,1105 & -3,5475 & 0,9673 & -0,1490 & 0,0197 & -0,0025 & -0,0008 & 0,0004 & 0,0001 & 0,0002 \\ -3,5475 & 5,1920 & -3,3819 & 0,8876 & -0,1077 & 0,0162 & -0,0033 & 0,0023 & -0,0004 & -0,0001 \\ 0,9673 & -3,3819 & 4,9972 & -3,0018 & 0,6525 & -0,0959 & 0,0173 & -0,0046 & 0,0002 & 0,0010 \\ -0,1491 & 0,8876 & -3,0018 & 4,0024 & -2,1983 & 0,4976 & -0,0729 & 0,0107 & -0,0001 & -0,0007 \\ 0,0203 & -0,1081 & 0,6526 & -2,1983 & 3,2070 & -1,9759 & 0,4613 & -0,0585 & 0,0032 & 0,0006 \\ -0,0048 & 0,0176 & -0,0963 & 0,4976 & -1,9759 & 3,1157 & -1,9436 & 0,4114 & -0,0252 & 0,0015 \\ 0,0028 & -0,0055 & 0,0179 & -0,0729 & 0,4614 & -1,9436 & 2,9856 & -1,6142 & 0,1812 & -0,0110 \\ -0,0016 & 0,0035 & -0,0049 & 0,0107 & -0,0585 & 0,4114 & -1,6142 & 1,8966 & -0,7134 & 0,0694 \\ 0,0003 & -0,0005 & 0,0002 & -0,0001 & 0,0032 & -0,0252 & 0,1812 & -0,7134 & 0,9690 & -0,4145 \\ 0,0002 & -0,0001 & 0,0010 & -0,0007 & 0,0006 & 0,0015 & -0,0110 & 0,0694 & -0,4145 & 0,3535 \end{bmatrix}$$

lalu didapatkan nilai kekakuan pada tiap tingkat sebagai berikut :

$$K_{10} = k_{10} - K_{10} = 353,5 \text{ KN/cm}$$

$$K_9 = k_{9-9} - K_{10} = 969 - 353,5 \Rightarrow K_9 = 615,5 \text{ KN/cm}$$

$$K_8 = k_{8-8} - K_9 = 1896,6 - 615,5 \Rightarrow K_8 = 1281,1 \text{ KN/cm}$$

$$K_7 = k_{7-7} - K_8 = 2985,6 - 1281,1 \Rightarrow K_7 = 1704,5 \text{ KN/cm}$$

$$K_6 = k_{6-6} - K_7 = 3115,7 - 1704,5 \Rightarrow K_6 = 1411,2 \text{ KN/cm}$$

$$K_5 = k_{5-5} - K_6 = 3207 - 1411,2 \Rightarrow K_5 = 1795,8 \text{ KN/cm}$$

$$K_4 = k_{4-4} - K_5 = 4002,4 - 1795,8 \Rightarrow K_4 = 2206,6 \text{ KN/cm}$$

$$K_3 = k_{3-3} - K_4 = 4997,2 - 2206,6 \Rightarrow K_3 = 2790,6 \text{ KN/cm}$$

$$K_2 = k_{2-2} - K_3 = 5192 - 2790,6 \Rightarrow K_2 = 2401,4 \text{ KN/cm}$$

$$K_1 = k_{1-1} - K_2 = 6110,5 - 2401,4 \Rightarrow K_1 = 3709,1 \text{ KN/cm}$$

3.7.2 Kekakuan tingkat struktur portal rangka diperkaku konsentrik

A. Portal 2 tingkat

1. $F = 1$ unit di tingkat 1 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{11} = 0,4310 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{21} = 0,4310 \cdot 10^{-3}$$

2. $F = 1$ unit di tingkat 2 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{12} = 0,4310 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{22} = 1,1506 \cdot 10^{-3}$$

sehingga dapat dituliskan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$[\delta] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0,4310 & 0,4310 \\ 0,4310 & 1,1506 \end{bmatrix}$$

setelah di inverse diperoleh matrik kekakuan tingkat sebagai berikut :

$$[K] = 10^3 \cdot \begin{bmatrix} 3,7098 & -1,3897 \\ -1,3897 & 1,3897 \end{bmatrix}$$

lalu didapatkan nilai kekakuan pada tiap tingkat sebagai berikut :

$$K_2 = k_{22} = 1389,7 \text{ KN/cm}$$

$$K_1 = k_{11} - K_2 = 3709,8 - 1389,7 \Rightarrow K_1 = 2320,1 \text{ KN/cm}$$

B. Portal 4 tingkat

1. $F = 1$ unit di tingkat 1 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{11} = 0,2416 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{21} = 0,2487 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{31} = 0,2494 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{41} = 0,2510 \cdot 10^{-3}$$

2. $F = 1$ unit di tingkat 2 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{12} = 0,2487 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{22} = 0,5727 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{32} = 0,6504 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{42} = 0,7235 \cdot 10^{-3}$$

3. $F = 1$ unit di tingkat 3 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{13} = 0,2494 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{23} = 0,26504 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{33} = 1,1180 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{43} = 1,3396 \cdot 10^{-3}$$

4. $F = 1$ unit di tingkat 4 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{14} = 0,2510 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{24} = 0,7235 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{34} = 1,3396 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{44} = 2,0282 \cdot 10^{-3}$$

sehingga dapat dituliskan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$[\delta] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0,2416 & 0,2487 & 0,2494 & 0,2510 \\ 0,2487 & 0,5727 & 0,6504 & 0,7235 \\ 0,2494 & 0,6504 & 1,1180 & 1,3396 \\ 0,2510 & 0,7235 & 1,3396 & 2,0282 \end{bmatrix}$$

setelah di inverse diperoleh matrik kekakuan tingkat sebagai berikut :

$$[K] = 10^3 \cdot \begin{bmatrix} 7,6971 & -4,0057 & 0,2038 & 0,3418 \\ -4,0057 & 7,4333 & -4,0631 & 0,5278 \\ 0,2038 & -4,0631 & 7,2209 & -3,3451 \\ 0,3418 & 0,5278 & -3,3451 & 2,4719 \end{bmatrix}$$

lalu didapatkan nilai kekakuan pada tiap tingkat sebagai berikut :

$$K_4 = k_{44} = 2471,9 \text{ KN/cm}$$

$$K_3 = k_{33} - K_4 = 7220,9 - 2471,9 \Rightarrow K_3 = 4749 \text{ KN/cm}$$

$$K_2 = k_{22} - K_3 = 7433,3 - 4749 \Rightarrow K_2 = 2684,3 \text{ KN/cm}$$

$$K_1 = k_{11} - K_2 = 7697,1 - 2684,3 \Rightarrow K_1 = 5012,8 \text{ KN/cm}$$

C. Portal 6 tingkat

1. $F = 1$ unit di tingkat 1 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{11} = 0,1790 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{21} = 0,1878 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{31} = 0,1876 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{41} = 0,1890 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{51} = 0,1901 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{61} = 0,1913 \cdot 10^{-3}$$

2. $F = 1$ unit di tingkat 2 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{12} = 0,1878 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{22} = 0,4149 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{32} = 0,4558 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{42} = 0,4905 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{52} = 0,5260 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{62} = 0,5615 \cdot 10^{-3}$$

3. $F = 1$ unit di tingkat 3 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{13} = 0,1876 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{23} = 0,4558 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{33} = 0,7503 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{43} = 0,8594 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{53} = 0,9633 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{63} = 1,0678 \cdot 10^{-3}$$

4. $F = 1$ unit di tingkat 4 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{14} = 0,1890 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{24} = 0,4905 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{34} = 0,8594 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{44} = 1,2613 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{54} = 1,4703 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{64} = 1,6770 \cdot 10^{-3}$$

5. $F = 1$ unit di tingkat 5 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{15} = 0,1901 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{25} = 0,5260 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{35} = 0,9633 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{45} = 1,4703 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{55} = 2,1116 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{65} = 2,4582 \cdot 10^{-3}$$

6. $F = 1$ unit di tingkat 6 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{16} = 0,1913 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{26} = 0,5615 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{36} = 1,0678 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{46} = 1,6770 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{56} = 2,4582 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{66} = 3,5008 \cdot 10^{-3}$$

sehingga dapat dituliskan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$[\delta] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0,1790 & 0,1878 & 0,1876 & 0,1890 & 0,1901 & 0,1913 \\ 0,1878 & 0,4149 & 0,4558 & 0,4905 & 0,5260 & 0,5615 \\ 0,1876 & 0,4558 & 0,7503 & 0,8594 & 0,9633 & 1,0678 \\ 0,1890 & 0,4905 & 0,8594 & 1,2613 & 1,4703 & 1,6770 \\ 0,1901 & 0,5260 & 0,9633 & 1,4703 & 2,1116 & 1,049 \\ 0,1913 & 0,5615 & 1,0678 & 1,6770 & 2,4582 & 3,5008 \end{bmatrix}$$

setelah di inverse diperoleh matrik kekakuan tingkat sebagai berikut :

$$[K] = 10^3 \cdot \begin{bmatrix} 10,8571 & -5,6896 & 0,3862 & 0,0946 & 0,0877 & 0,0946 \\ -5,6896 & 10,4812 & -5,6323 & 0,3641 & 0,0847 & 0,1138 \\ 0,3862 & -5,6323 & 10,1969 & -5,2239 & 0,1880 & 0,1425 \\ 0,0946 & 0,3641 & -5,2239 & 8,1513 & -3,4348 & 0,0369 \\ 0,0877 & 0,0847 & 0,1880 & -3,4348 & 5,0566 & -1,9810 \\ 0,0946 & 0,1138 & 0,1425 & 0,0369 & -1,9810 & 1,5921 \end{bmatrix}$$

lalu didapatkan nilai kekakuan pada tiap tingkat sebagai berikut :

$$K_6 = k_{66} = 1592,1 \text{ KN/cm}$$

$$K_5 = k_{55} - K_6 = 5056,6 - 1592,1 \Rightarrow K_5 = 3464,5 \text{ KN/cm}$$

$$K_4 = k_{44} - K_5 = 8151,3 - 3464,5 \Rightarrow K_4 = 4686,8 \text{ KN/cm}$$

$$K_3 = k_{33} - K_4 = 10196,9 - 4686,8 \Rightarrow K_3 = 5510,1 \text{ KN/cm}$$

$$K_2 = k_{22} - K_3 = 10481,2 - 5510,1 \Rightarrow K_2 = 4971,1 \text{ KN/cm}$$

$$K_1 = k_{11} - K_2 = 10857,1 - 4971,1 \Rightarrow K_1 = 5886 \text{ KN/cm}$$

D. Portal 8 tingkat

1. $F = 1$ unit di tingkat 1 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{11} = 0,1454 \cdot 10^{-3} & \delta_{21} = 0,1581 \cdot 10^{-3} & \delta_{31} = 0,1577 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{41} = 0,1590 \cdot 10^{-3} & \delta_{51} = 0,1601 \cdot 10^{-3} & \delta_{61} = 0,1613 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{71} = 0,1624 \cdot 10^{-3} & \delta_{81} = 0,1635 \cdot 10^{-3} & \end{array}$$

2. $F = 1$ unit di tingkat 2 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{12} = 0,1581 \cdot 10^{-3} & \delta_{22} = 0,3448 \cdot 10^{-3} & \delta_{32} = 0,3749 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{42} = 0,3953 \cdot 10^{-3} & \delta_{52} = 0,4168 \cdot 10^{-3} & \delta_{62} = 0,4382 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{72} = 0,4596 \cdot 10^{-3} & \delta_{82} = 0,4810 \cdot 10^{-3} & \end{array}$$

3. $F = 1$ unit di tingkat 3 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{13} = 0,1577 \cdot 10^{-3} & \delta_{23} = 0,3749 \cdot 10^{-3} & \delta_{33} = 0,6001 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{43} = 0,6704 \cdot 10^{-3} & \delta_{53} = 0,7320 \cdot 10^{-3} & \delta_{63} = 0,7948 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{73} = 0,8571 \cdot 10^{-3} & \delta_{83} = 0,9193 \cdot 10^{-3} & \end{array}$$

4. $F = 1$ unit di tingkat 4 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{14} = 0,1590 \cdot 10^{-3} & \delta_{24} = 0,3953 \cdot 10^{-3} & \delta_{34} = 0,6704 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{44} = 0,9627 \cdot 10^{-3} & \delta_{54} = 1,0900 \cdot 10^{-3} & \delta_{64} = 1,2122 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{74} = 1,3350 \cdot 10^{-3} & \delta_{84} = 1,4578 \cdot 10^{-3} & \end{array}$$

5. $F = 1$ unit di tingkat 5 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{15} = 0,1601 \cdot 10^{-3} & \delta_{25} = 0,4168 \cdot 10^{-3} & \delta_{35} = 0,7320 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{45} = 1,0900 \cdot 10^{-3} & \delta_{55} = 1,5149 \cdot 10^{-3} & \delta_{65} = 1,7233 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{75} = 1,9277 \cdot 10^{-3} & \delta_{85} = 2,1327 \cdot 10^{-3} & \end{array}$$

6. $F = 1$ unit di tingkat 6 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{16} &= 0,1613 \cdot 10^{-3} & \delta_{26} &= 0,4382 \cdot 10^{-3} & \delta_{36} &= 0,7948 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{46} &= 1,2122 \cdot 10^{-3} & \delta_{56} &= 1,7233 \cdot 10^{-3} & \delta_{66} &= 2,3028 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{76} &= 2,6649 \cdot 10^{-3} & \delta_{86} &= 3,0234 \cdot 10^{-3} & & \end{aligned}$$

7. $F = 1$ unit di tingkat 7 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{17} &= 0,1624 \cdot 10^{-3} & \delta_{27} &= 0,4596 \cdot 10^{-3} & \delta_{37} &= 0,8571 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{47} &= 1,3350 \cdot 10^{-3} & \delta_{57} &= 1,9277 \cdot 10^{-3} & \delta_{67} &= 2,6649 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{77} &= 3,4711 \cdot 10^{-3} & \delta_{87} &= 4,0587 \cdot 10^{-3} & & \end{aligned}$$

8. $F = 1$ unit di tingkat 8 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{18} &= 0,1635 \cdot 10^{-3} & \delta_{28} &= 0,4810 \cdot 10^{-3} & \delta_{38} &= 0,9193 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{48} &= 1,4578 \cdot 10^{-3} & \delta_{58} &= 2,1327 \cdot 10^{-3} & \delta_{68} &= 3,0234 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{78} &= 4,0587 \cdot 10^{-3} & \delta_{88} &= 5,1658 \cdot 10^{-3} & & \end{aligned}$$

sehingga dapat dituliskan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$[\delta] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0,1454 & 0,1581 & 0,1577 & 0,1590 & 0,1601 & 0,1613 & 0,1624 & 0,1635 \\ 0,1581 & 0,3448 & 0,3749 & 0,3953 & 0,4168 & 0,4382 & 0,4596 & 0,4810 \\ 0,1577 & 0,3749 & 0,6001 & 0,6704 & 0,7320 & 0,7948 & 0,8571 & 0,9193 \\ 0,1590 & 0,3953 & 0,6704 & 0,9627 & 1,0900 & 1,2122 & 1,3350 & 1,4578 \\ 0,1601 & 0,4168 & 0,7320 & 1,0900 & 1,5149 & 1,7233 & 1,9277 & 0,857 \\ 0,1613 & 0,4382 & 0,7948 & 1,2122 & 1,7233 & 2,3028 & 2,6649 & 3,0234 \\ 0,1624 & 0,4596 & 0,8571 & 1,3350 & 1,9277 & 2,6649 & 3,4711 & 4,0587 \\ 0,1635 & 0,4810 & 0,9193 & 1,4578 & 2,1327 & 3,0234 & 4,0587 & 5,1658 \end{bmatrix}$$

setelah di inverse diperoleh matrik kekakuan tingkat sebagai berikut :

$$[K] = 10^3 \cdot \begin{bmatrix} 13,9625 & -7,4148 & 0,6988 & 0,0069 & 0,0885 & 0,0315 & 0,0171 & 0,0538 \\ -7,4148 & 13,2659 & -7,2240 & 0,5854 & 0,0258 & 0,0645 & 0,0205 & 0,0553 \\ 0,6988 & -7,2240 & 12,7930 & -6,5731 & 0,3216 & 0,0042 & 0,0204 & 0,0775 \\ 0,0069 & 0,5854 & -6,5731 & 10,6187 & -4,8326 & 0,1508 & -0,0035 & 0,0280 \\ 0,0885 & 0,0258 & 0,3216 & -4,8326 & 8,3808 & -4,4952 & 0,2003 & 0,3148 \\ 0,0315 & 0,0645 & 0,0042 & 0,1508 & -4,4952 & 8,2163 & -4,5377 & 0,5619 \\ 0,0171 & 0,0205 & 0,0204 & -0,0035 & 0,2003 & -4,5377 & 8,0027 & -3,7196 \\ 0,0538 & 0,0553 & 0,0775 & 0,0280 & 0,3148 & 0,5619 & -3,7196 & 2,6286 \end{bmatrix}$$

lalu didapatkan nilai kekakuan pada tiap tingkat sebagai berikut :

$$K_8 = k_{88} = 2628,6 \text{ KN/cm}$$

$$K_7 = k_{77} - K_8 = 8002,7 - 2628,6 \Rightarrow K_7 = 5374,1 \text{ KN/cm}$$

$$K_6 = k_{66} - K_7 = 8216,3 - 5374,1 \Rightarrow K_6 = 2842,2 \text{ KN/cm}$$

$$K_5 = k_{55} - K_6 = 8380,8 - 2842,2 \Rightarrow K_5 = 5538,6 \text{ KN/cm}$$

$$K_4 = k_{44} - K_5 = 10618,7 - 5538,6 \Rightarrow K_4 = 5080,1 \text{ KN/cm}$$

$$K_3 = k_{33} - K_4 = 12793 - 5080,1 \Rightarrow K_3 = 7712,9 \text{ KN/cm}$$

$$K_2 = k_{22} - K_3 = 13265,9 - 7712,9 \Rightarrow K_2 = 5553 \text{ KN/cm}$$

$$K_1 = k_{11} - K_2 = 13962,5 - 5553 \Rightarrow K_1 = 8409,5 \text{ KN/cm}$$

E. Portal 10 tingkat

1. $F = 1$ unit di tingkat 1 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{11} &= 0,1301 \cdot 10^{-3} & \delta_{21} &= 0,1445 \cdot 10^{-3} & \delta_{31} &= 0,1440 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{41} &= 0,1453 \cdot 10^{-3} & \delta_{51} &= 0,1464 \cdot 10^{-3} & \delta_{61} &= 0,1475 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{71} &= 0,1486 \cdot 10^{-3} & \delta_{81} &= 0,1497 \cdot 10^{-3} & \delta_{91} &= 0,1507 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{101} &= 0,1518 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

2. $F = 1$ unit di tingkat 2 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{12} &= 0,1445 \cdot 10^{-3} & \delta_{22} &= 0,3149 \cdot 10^{-3} & \delta_{32} &= 0,3420 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{42} &= 0,3576 \cdot 10^{-3} & \delta_{52} &= 0,3744 \cdot 10^{-3} & \delta_{62} &= 0,3911 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{72} &= 0,4079 \cdot 10^{-3} & \delta_{82} &= 0,4247 \cdot 10^{-3} & \delta_{92} &= 0,4414 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{102} &= 0,4581 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

3. $F = 1$ unit di tingkat 3 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{13} &= 0,1440 \cdot 10^{-3} & \delta_{23} &= 0,3420 \cdot 10^{-3} & \delta_{33} &= 0,5414 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{43} &= 0,5996 \cdot 10^{-3} & \delta_{53} &= 0,6469 \cdot 10^{-3} & \delta_{63} &= 0,6955 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{73} &= 0,7440 \cdot 10^{-3} & \delta_{83} &= 0,7920 \cdot 10^{-3} & \delta_{93} &= 0,8405 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{103} &= 0,8885 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

4. $F = 1$ unit di tingkat 4 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{14} &= 0,1453 \cdot 10^{-3} & \delta_{24} &= 0,3576 \cdot 10^{-3} & \delta_{34} &= 0,5996 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{44} &= 0,8519 \cdot 10^{-3} & \delta_{54} &= 0,9530 \cdot 10^{-3} & \delta_{64} &= 1,0472 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{74} &= 1,1420 \cdot 10^{-3} & \delta_{84} &= 1,2368 \cdot 10^{-3} & \delta_{94} &= 1,3316 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{104} &= 1,4264 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

5. $F = 1$ unit di tingkat 5 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{15} = 0,1464 \cdot 10^{-3} & \delta_{25} = 0,3744 \cdot 10^{-3} & \delta_{35} = 0,6469 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{45} = 0,9530 \cdot 10^{-3} & \delta_{55} = 1,3013 \cdot 10^{-3} & \delta_{65} = 1,4640 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{75} = 1,6216 \cdot 10^{-3} & \delta_{85} = 1,7798 \cdot 10^{-3} & \delta_{95} = 1,9380 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{105} = 2,0961 \cdot 10^{-3} & & \end{array}$$

6. $F = 1$ unit di tingkat 6 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{16} = 0,1475 \cdot 10^{-3} & \delta_{26} = 0,3911 \cdot 10^{-3} & \delta_{36} = 0,6955 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{46} = 1,0472 \cdot 10^{-3} & \delta_{56} = 1,4640 \cdot 10^{-3} & \delta_{66} = 1,9180 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{76} = 2,1846 \cdot 10^{-3} & \delta_{86} = 2,4462 \cdot 10^{-3} & \delta_{96} = 2,7088 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{106} = 2,9709 \cdot 10^{-3} & & \end{array}$$

7. $F = 1$ unit di tingkat 7 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{17} = 0,1486 \cdot 10^{-3} & \delta_{27} = 0,4079 \cdot 10^{-3} & \delta_{37} = 0,7440 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{47} = 1,1420 \cdot 10^{-3} & \delta_{57} = 1,6216 \cdot 10^{-3} & \delta_{67} = 2,1846 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{77} = 2,7836 \cdot 10^{-3} & \delta_{87} = 3,1953 \cdot 10^{-3} & \delta_{97} = 3,6030 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{107} = 4,0107 \cdot 10^{-3} & & \end{array}$$

8. $F = 1$ unit di tingkat 8 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{18} = 0,1497 \cdot 10^{-3} & \delta_{28} = 0,4247 \cdot 10^{-3} & \delta_{38} = 0,7920 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{48} = 1,2368 \cdot 10^{-3} & \delta_{58} = 1,7798 \cdot 10^{-3} & \delta_{68} = 2,4462 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{78} = 3,1953 \cdot 10^{-3} & \delta_{88} = 3,9839 \cdot 10^{-3} & \delta_{98} = 4,5800 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{108} = 5,1738 \cdot 10^{-3} & & \end{array}$$

9. $F = 1$ unit di tingkat 9 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{19} &= 0,1507 \cdot 10^{-3} & \delta_{29} &= 0,4414 \cdot 10^{-3} & \delta_{39} &= 0,8405 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{49} &= 1,3316 \cdot 10^{-3} & \delta_{59} &= 1,9380 \cdot 10^{-3} & \delta_{69} &= 2,7088 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{79} &= 3,6030 \cdot 10^{-3} & \delta_{89} &= 4,5800 \cdot 10^{-3} & \delta_{99} &= 5,7602 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{109} &= 6,5853 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

10. $F = 1$ unit di tingkat 10 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{110} &= 0,1518 \cdot 10^{-3} & \delta_{210} &= 0,4581 \cdot 10^{-3} & \delta_{310} &= 0,8885 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{410} &= 1,4264 \cdot 10^{-3} & \delta_{510} &= 2,0961 \cdot 10^{-3} & \delta_{610} &= 2,9709 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{710} &= 4,0107 \cdot 10^{-3} & \delta_{810} &= 5,1738 \cdot 10^{-3} & \delta_{910} &= 6,5853 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{1010} &= 8,2578 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

sehingga dapat dituliskan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$: [\delta] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0,1301 & 0,1445 & 0,1440 & 0,1453 & 0,1464 & 0,1475 & 0,1486 & 0,1497 & 0,1507 & 0,1518 \\ 0,1445 & 0,3149 & 0,3420 & 0,3576 & 0,3744 & 0,3911 & 0,4079 & 0,4247 & 0,4414 & 0,4581 \\ 0,1440 & 0,3420 & 0,5414 & 0,5996 & 0,6469 & 0,6955 & 0,7440 & 0,7920 & 0,8405 & 0,8885 \\ 0,1453 & 0,3576 & 0,5996 & 0,8519 & 0,9530 & 1,0472 & 1,1420 & 1,2368 & 1,3316 & 1,4264 \\ 0,1464 & 0,3744 & 0,6469 & 0,9530 & 1,3013 & 1,4640 & 1,6216 & 1,7798 & 1,9380 & 2,0961 \\ 0,1475 & 0,3911 & 0,6955 & 1,0472 & 1,4640 & 1,9180 & 2,1846 & 2,4462 & 2,7088 & 2,9709 \\ 0,1486 & 0,4079 & 0,7440 & 1,1420 & 1,6216 & 2,1846 & 2,7836 & 3,1953 & 3,6030 & 4,0107 \\ 0,1497 & 0,4247 & 0,7920 & 1,2368 & 1,7798 & 2,4462 & 3,1953 & 3,9839 & 4,5800 & 5,1738 \\ 0,1507 & 0,4414 & 0,8405 & 1,3316 & 1,9380 & 2,7088 & 3,6030 & 4,5800 & 5,7602 & 6,5853 \\ 0,1518 & 0,4581 & 0,8885 & 1,4264 & 2,0961 & 2,9709 & 4,0107 & 5,1738 & 6,5853 & 8,2578 \end{bmatrix}$$

setelah di inverse diperoleh matrik kekakuan tingkat sebagai berikut :

$$[K] = 10^3 \cdot \begin{bmatrix} 15,9610 & -8,5489 & 0,9716 & -0,0673 & 0,0797 & 0,0329 & 0,0196 & 0,0324 & 0,0139 & 0,0150 \\ -8,5489 & 15,0109 & -8,2889 & 0,8082 & -0,0209 & 0,0571 & 0,0426 & 0,0153 & 0,0202 & 0,0151 \\ 0,9716 & -8,2889 & 14,4694 & -7,5284 & 0,4595 & 0,0040 & -0,0056 & 0,0730 & -0,0017 & 0,0258 \\ -0,0673 & 0,8082 & -7,5284 & 12,2889 & -5,8128 & 0,2294 & 0,0118 & 0,0118 & 0,0183 & 0,0089 \\ 0,0797 & -0,0209 & 0,4595 & -5,8128 & 10,2263 & -5,4353 & 0,2698 & 0,1133 & 0,0541 & 0,0689 \\ 0,0329 & 0,0571 & 0,0040 & 0,2294 & -5,4353 & 10,0557 & -5,4584 & 0,3559 & 0,0583 & 0,0997 \\ 0,0196 & 0,0426 & -0,0056 & 0,0118 & 0,2698 & -5,4584 & 9,9130 & -5,0859 & 0,1475 & 0,1454 \\ 0,0324 & 0,0153 & 0,0730 & 0,0118 & 0,1133 & 0,3559 & -5,0859 & 7,4046 & -2,8891 & -0,0333 \\ 0,0139 & 0,0202 & -0,0017 & 0,0183 & 0,0541 & 0,0583 & 0,1475 & -2,8891 & 4,3502 & -1,7696 \\ 0,0150 & 0,0151 & 0,0258 & 0,0089 & 0,0689 & 0,0997 & 0,1454 & -0,0333 & -1,7696 & 1,4237 \end{bmatrix}$$

lalu didapatkan nilai kekakuan pada tiap tingkat sebagai berikut :

$$K_{10} = k_{10} - K_{9} = 1423,7 \text{ KN/cm}$$

$$K_9 = k_9 - K_{10} = 4350,2 - 1423,7 \Rightarrow K_9 = 2926,5 \text{ KN/cm}$$

$$K_8 = k_8 - K_9 = 7404,6 - 2926,5 \Rightarrow K_8 = 4478,1 \text{ KN/cm}$$

$$K_7 = k_7 - K_8 = 9913 - 4478,1 \Rightarrow K_7 = 5434,9 \text{ KN/cm}$$

$$K_6 = k_6 - K_7 = 10055,7 - 5434,9 \Rightarrow K_6 = 4620,8 \text{ KN/cm}$$

$$K_5 = k_5 - K_6 = 10226,3 - 4620,8 \Rightarrow K_5 = 5605,5 \text{ KN/cm}$$

$$K_4 = k_4 - K_5 = 12288,9 - 5605,5 \Rightarrow K_4 = 6683,4 \text{ KN/cm}$$

$$K_3 = k_3 - K_4 = 14469,4 - 6683,4 \Rightarrow K_3 = 7786 \text{ KN/cm}$$

$$K_2 = k_2 - K_3 = 15010,9 - 7786 \Rightarrow K_2 = 7224,9 \text{ KN/cm}$$

$$K_1 = k_1 - K_2 = 15961 - 7224,9 \Rightarrow K_1 = 8736,1 \text{ KN/cm}$$

3.7.3 Kekakuan tingkat struktur portal rangka diperkaku eksentrik

A. Portal 2 tingkat

1. $F = 1$ unit di tingkat 1 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{11} = 1,0524 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{21} = 1,0815 \cdot 10^{-3}$$

2. $F = 1$ unit di tingkat 2 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{12} = 1,0815 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{22} = 2,6928 \cdot 10^{-3}$$

sehingga dapat dituliskan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$[\delta] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 1,0524 & 1,0815 \\ 1,0815 & 2,6928 \end{bmatrix}$$

setelah di inverse diperoleh matrik kekakuan tingkat sebagai berikut :

$$[K] = 10^3 \cdot \begin{bmatrix} 1,6180 & -0,6498 \\ -0,6498 & 0,6324 \end{bmatrix}$$

lalu didapatkan nilai kekakuan pada tiap tingkat sebagai berikut :

$$K_2 = k_{22} = 632,4 \text{ KN/cm}$$

$$K_1 = k_{11} - K_2 = 1618 - 632,4 \Rightarrow K_1 = 985,6 \text{ KN/cm}$$

B. Portal 4 tingkat

1. $F = 1$ unit di tingkat 1 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{11} = 0,4473 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{21} = 0,4746 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{31} = 0,4634 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{41} = 0,4526 \cdot 10^{-3}$$

2. $F = 1$ unit di tingkat 2 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{12} = 0,4746 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{22} = 1,0564 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{32} = 1,1494 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{42} = 1,2042 \cdot 10^{-3}$$

3. $F = 1$ unit di tingkat 3 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{13} = 0,4634 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{23} = 1,1494 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{33} = 1,8797 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{43} = 2,1401 \cdot 10^{-3}$$

4. $F = 1$ unit di tingkat 4 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\delta_{14} = 0,4526 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{24} = 1,2042 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_{34} = 2,1401 \cdot 10^{-3} \quad \delta_{44} = 3,4614 \cdot 10^{-3}$$

sehingga dapat dituliskan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$[\delta] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0,4473 & 0,4746 & 0,4634 & 0,4526 \\ 0,4746 & 1,0564 & 1,1494 & 1,2042 \\ 0,4634 & 1,1494 & 1,8797 & 2,1401 \\ 0,4526 & 1,2042 & 2,1401 & 3,4614 \end{bmatrix}$$

setelah di inverse diperoleh matrik kekakuan tingkat sebagai berikut :

$$[K] = 10^3 \cdot \begin{bmatrix} 4,3616 & -2,3352 & 0,2602 & 0,0812 \\ -2,3352 & 4,1663 & -2,2607 & 0,2537 \\ 0,2602 & -2,2607 & 3,3557 & -1,3222 \\ 0,0812 & 0,2537 & -1,3222 & 1,0075 \end{bmatrix}$$

lalu didapatkan nilai kekakuan pada tiap tingkat sebagai berikut :

$$K_4 = k_{44} = 1007,5 \text{ KN/cm}$$

$$K_3 = k_{33} - K_4 = 3355,7 - 1007,5 \Rightarrow K_3 = 2348,2 \text{ KN/cm}$$

$$K_2 = k_{22} - K_3 = 4166,3 - 2348,2 \Rightarrow K_2 = 1818,1 \text{ KN/cm}$$

$$K_1 = k_{11} - K_2 = 4361,6 - 1818,1 \Rightarrow K_1 = 2543,5 \text{ KN/cm}$$

C. Portal 6 tingkat

1. $F = 1$ unit di tingkat 1 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{11} &= 0,2845 \cdot 10^{-3} & \delta_{21} &= 0,3138 \cdot 10^{-3} & \delta_{31} &= 0,3092 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{41} &= 0,3053 \cdot 10^{-3} & \delta_{51} &= 0,3014 \cdot 10^{-3} & \delta_{61} &= 0,2974 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

2. $F = 1$ unit di tingkat 2 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{12} &= 0,3138 \cdot 10^{-3} & \delta_{22} &= 0,6886 \cdot 10^{-3} & \delta_{32} &= 0,7469 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{42} &= 0,7726 \cdot 10^{-3} & \delta_{52} &= 0,7988 \cdot 10^{-3} & \delta_{62} &= 0,8251 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

3. $F = 1$ unit di tingkat 3 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{13} &= 0,3092 \cdot 10^{-3} & \delta_{23} &= 0,7469 \cdot 10^{-3} & \delta_{33} &= 1,1877 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{43} &= 1,3127 \cdot 10^{-3} & \delta_{53} &= 1,4058 \cdot 10^{-3} & \delta_{63} &= 1,4989 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

4. $F = 1$ unit di tingkat 4 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{14} &= 0,3053 \cdot 10^{-3} & \delta_{24} &= 0,7726 \cdot 10^{-3} & \delta_{34} &= 1,3127 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{44} &= 1,8780 \cdot 10^{-3} & \delta_{54} &= 2,0887 \cdot 10^{-3} & \delta_{64} &= 2,2834 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

5. $F = 1$ unit di tingkat 5 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{15} &= 0,3014 \cdot 10^{-3} & \delta_{25} &= 0,7988 \cdot 10^{-3} & \delta_{35} &= 1,4058 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{45} &= 2,0887 \cdot 10^{-3} & \delta_{55} &= 2,9926 \cdot 10^{-3} & \delta_{65} &= 3,2998 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

6. $F = 1$ unit di tingkat 6 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{16} &= 0,2974 \cdot 10^{-3} & \delta_{26} &= 0,8251 \cdot 10^{-3} & \delta_{36} &= 1,4989 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{46} &= 2,2834 \cdot 10^{-3} & \delta_{56} &= 3,2998 \cdot 10^{-3} & \delta_{66} &= 5,2400 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

sehingga dapat dituliskan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$[\delta] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0,2845 & 0,3138 & 0,3092 & 0,3053 & 0,3014 & 0,2974 \\ 0,3138 & 0,6886 & 0,7469 & 0,7726 & 0,7988 & 0,8251 \\ 0,3092 & 0,7469 & 1,1877 & 1,3127 & 1,4058 & 1,4989 \\ 0,3053 & 0,7726 & 1,3127 & 1,8780 & 2,0887 & 2,2834 \\ 0,3014 & 0,7988 & 1,4058 & 2,0887 & 2,9926 & 3,2998 \\ 0,2974 & 0,8251 & 1,4989 & 2,2834 & 3,2998 & 5,2400 \end{bmatrix}$$

setelah di inverse diperoleh matrik kekakuan tingkat sebagai berikut :

$$[K] = 10^3 \cdot \begin{bmatrix} 7,2133 & -3,8893 & 0,4442 & 0,0122 & 0,0543 & 0,0365 \\ -3,8893 & 6,8229 & -3,8233 & 0,4045 & 0,0454 & 0,0352 \\ 0,4442 & -3,8233 & 6,5188 & -3,2845 & 0,1566 & 0,0447 \\ 0,0122 & 0,4045 & -3,2845 & 4,7600 & -1,8532 & -0,0321 \\ 0,0543 & 0,0454 & 0,1566 & -1,8532 & 2,3122 & -0,7036 \\ 0,0365 & 0,0352 & 0,0447 & -0,0321 & -0,7036 & 0,6275 \end{bmatrix}$$

lalu didapatkan nilai kekakuan pada tiap tingkat sebagai berikut :

$$K_6 = k_{66} = 627,5 \text{ KN/cm}$$

$$K_5 = k_{55} - K_6 = 2312,2 - 627,5 \Rightarrow K_5 = 1684,7 \text{ KN/cm}$$

$$K_4 = k_{44} - K_5 = 4760 - 1684,7 \Rightarrow K_4 = 3075,3 \text{ KN/cm}$$

$$K_3 = k_{33} - K_4 = 6518,8 - 3075,3 \Rightarrow K_3 = 3443,5 \text{ KN/cm}$$

$$K_2 = k_{22} - K_3 = 6822,9 - 3443,5 \Rightarrow K_2 = 3379,4 \text{ KN/cm}$$

$$K_1 = k_{11} - K_2 = 7213,3 - 3379,4 \Rightarrow K_1 = 3833,9 \text{ KN/cm}$$

D. Portal 8 tingkat

1. $F = 1$ unit di tingkat 1 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{11} = 0,2078 \cdot 10^{-3} & \delta_{21} = 0,2370 \cdot 10^{-3} & \delta_{31} = 0,2347 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{41} = 0,2330 \cdot 10^{-3} & \delta_{51} = 0,2313 \cdot 10^{-3} & \delta_{61} = 0,2295 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{71} = 0,2278 \cdot 10^{-3} & \delta_{81} = 0,2261 \cdot 10^{-3} & \end{array}$$

2. $F = 1$ unit di tingkat 2 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{12} = 0,2370 \cdot 10^{-3} & \delta_{22} = 0,5196 \cdot 10^{-3} & \delta_{32} = 0,5653 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{42} = 0,5813 \cdot 10^{-3} & \delta_{52} = 0,5973 \cdot 10^{-3} & \delta_{62} = 0,6133 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{72} = 0,6292 \cdot 10^{-3} & \delta_{82} = 0,6452 \cdot 10^{-3} & \end{array}$$

3. $F = 1$ unit di tingkat 3 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{13} = 0,2347 \cdot 10^{-3} & \delta_{23} = 0,5653 \cdot 10^{-3} & \delta_{33} = 0,8868 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{43} = 0,9718 \cdot 10^{-3} & \delta_{53} = 1,0267 \cdot 10^{-3} & \delta_{63} = 1,0820 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{73} = 1,1374 \cdot 10^{-3} & \delta_{83} = 1,1928 \cdot 10^{-3} & \end{array}$$

4. $F = 1$ unit di tingkat 4 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{14} = 0,2330 \cdot 10^{-3} & \delta_{24} = 0,5813 \cdot 10^{-3} & \delta_{34} = 0,9718 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{44} = 1,3710 \cdot 10^{-3} & \delta_{54} = 1,5023 \cdot 10^{-3} & \delta_{64} = 1,6171 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{74} = 1,7318 \cdot 10^{-3} & \delta_{84} = 1,8466 \cdot 10^{-3} & \end{array}$$

5. $F = 1$ unit di tingkat 5 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{15} = 0,2313 \cdot 10^{-3} & \delta_{25} = 0,5973 \cdot 10^{-3} & \delta_{35} = 1,0267 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{45} = 1,5023 \cdot 10^{-3} & \delta_{55} = 2,0664 \cdot 10^{-3} & \delta_{65} = 2,2692 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{75} = 2,4559 \cdot 10^{-3} & \delta_{85} = 2,6374 \cdot 10^{-3} & \end{array}$$

6. $F = 1$ unit di tingkat 6 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{16} &= 0,2295 \cdot 10^{-3} & \delta_{26} &= 0,6133 \cdot 10^{-3} & \delta_{36} &= 1,0820 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{46} &= 1,6171 \cdot 10^{-3} & \delta_{56} &= 2,2692 \cdot 10^{-3} & \delta_{66} &= 2,9943 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{76} &= 3,3518 \cdot 10^{-3} & \delta_{86} &= 3,6915 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

7. $F = 1$ unit di tingkat 7 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{17} &= 0,2278 \cdot 10^{-3} & \delta_{27} &= 0,6292 \cdot 10^{-3} & \delta_{37} &= 1,1374 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{47} &= 1,7318 \cdot 10^{-3} & \delta_{57} &= 2,4559 \cdot 10^{-3} & \delta_{67} &= 3,3518 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{77} &= 4,3196 \cdot 10^{-3} & \delta_{87} &= 4,9420 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

8. $F = 1$ unit di tingkat 8 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{18} &= 0,2261 \cdot 10^{-3} & \delta_{28} &= 0,6452 \cdot 10^{-3} & \delta_{38} &= 1,1928 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{48} &= 1,8466 \cdot 10^{-3} & \delta_{58} &= 2,6374 \cdot 10^{-3} & \delta_{68} &= 3,6915 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{78} &= 4,9420 \cdot 10^{-3} & \delta_{88} &= 6,8246 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

sehingga dapat dituliskan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$[\delta] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0,2078 & 0,2370 & 0,2347 & 0,2330 & 0,2313 & 0,2295 & 0,2278 & 0,2261 \\ 0,2370 & 0,5196 & 0,5653 & 0,5813 & 0,5973 & 0,6133 & 0,6292 & 0,6452 \\ 0,2347 & 0,5653 & 0,8868 & 0,9718 & 1,0267 & 1,0820 & 1,1374 & 1,1928 \\ 0,2330 & 0,5813 & 0,9718 & 1,3710 & 1,5023 & 1,6171 & 1,7318 & 1,8466 \\ 0,2313 & 0,5973 & 1,0267 & 1,5023 & 2,0664 & 2,2692 & 2,4559 & 2,6374 \\ 0,2295 & 0,6133 & 1,0820 & 1,6171 & 2,2692 & 2,9943 & 3,3518 & 3,6915 \\ 0,2278 & 0,6292 & 1,1374 & 1,7318 & 2,4559 & 3,3518 & 4,3196 & 4,9420 \\ 0,2261 & 0,6452 & 1,1928 & 1,8466 & 2,6374 & 3,6915 & 4,9420 & 6,8246 \end{bmatrix}$$

setelah di inverse diperoleh matrik kekakuan tingkat sebagai berikut :

$$[K] = 10^3 \cdot \begin{bmatrix} 10,2492 & -5,5792 & 0,7577 & -0,0400 & 0,0333 & 0,0197 & 0,0323 & 0,0194 \\ -5,5792 & 9,5366 & -5,3910 & 0,6388 & 0,0004 & 0,0117 & 0,0373 & 0,0191 \\ 0,7577 & -5,3910 & 9,0431 & -4,6283 & 0,2584 & 0,0136 & 0,0356 & 0,0235 \\ -0,0400 & 0,6388 & -4,6283 & 7,0094 & -3,0835 & 0,1204 & 0,0023 & -0,0219 \\ 0,0333 & 0,0004 & 0,2580 & -3,0835 & 5,2942 & -2,8482 & 0,2510 & 0,1010 \\ 0,0197 & 0,0117 & 0,0136 & 0,1204 & -2,8482 & 5,1594 & -2,7001 & 0,2285 \\ 0,0323 & 0,0373 & 0,0356 & 0,0023 & 0,2510 & -2,7001 & 3,6126 & -1,2640 \\ 0,0194 & 0,0191 & 0,0235 & -0,0219 & 0,1010 & 0,2285 & -1,2640 & 0,8986 \end{bmatrix}$$

lalu didapatkan nilai kekakuan pada tiap tingkat sebagai berikut :

$$K_8 = k_{88} = 898,6 \text{ KN/cm}$$

$$K_7 = k_{77} - K_8 = 3612,6 - 898,6 \Rightarrow K_7 = 2714 \text{ KN/cm}$$

$$K_6 = k_{66} - K_7 = 5159,4 - 2714 \Rightarrow K_6 = 2445,4 \text{ KN/cm}$$

$$K_5 = k_{55} - K_6 = 5294,2 - 2445,4 \Rightarrow K_5 = 2848,8 \text{ KN/cm}$$

$$K_4 = k_{44} - K_5 = 7009,4 - 2848,8 \Rightarrow K_4 = 4160,6 \text{ KN/cm}$$

$$K_3 = k_{33} - K_4 = 9043,1 - 4160,6 \Rightarrow K_3 = 4882,5 \text{ KN/cm}$$

$$K_2 = k_{22} - K_3 = 9536,6 - 4882,5 \Rightarrow K_2 = 4160,6 \text{ KN/cm}$$

$$K_1 = k_{11} - K_2 = 10249,2 - 4160,6 \Rightarrow K_1 = 6088,6 \text{ KN/cm}$$

E. Portal 10 tingkat

1. $F = 1$ unit di tingkat 1 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{11} &= 0,1609 \cdot 10^{-3} & \delta_{21} &= 0,1897 \cdot 10^{-3} & \delta_{31} &= 0,1891 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{41} &= 0,1884 \cdot 10^{-3} & \delta_{51} &= 0,1877 \cdot 10^{-3} & \delta_{61} &= 0,1869 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{71} &= 0,1863 \cdot 10^{-3} & \delta_{81} &= 0,1855 \cdot 10^{-3} & \delta_{91} &= 0,1848 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{101} &= 0,1841 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

2. $F = 1$ unit di tingkat 2 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{12} &= 0,1897 \cdot 10^{-3} & \delta_{22} &= 0,4183 \cdot 10^{-3} & \delta_{32} &= 0,4589 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{42} &= 0,4698 \cdot 10^{-3} & \delta_{52} &= 0,4807 \cdot 10^{-3} & \delta_{62} &= 0,4917 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{72} &= 0,5026 \cdot 10^{-3} & \delta_{82} &= 0,5136 \cdot 10^{-3} & \delta_{92} &= 0,5245 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{102} &= 0,5354 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

3. $F = 1$ unit di tingkat 3 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{13} &= 0,1891 \cdot 10^{-3} & \delta_{23} &= 0,4589 \cdot 10^{-3} & \delta_{33} &= 0,7132 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{43} &= 0,7800 \cdot 10^{-3} & \delta_{53} &= 0,8165 \cdot 10^{-3} & \delta_{63} &= 0,8531 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{73} &= 0,8902 \cdot 10^{-3} & \delta_{83} &= 0,9267 \cdot 10^{-3} & \delta_{93} &= 0,9638 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{103} &= 1,0004 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

4. $F = 1$ unit di tingkat 4 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{14} &= 0,1884 \cdot 10^{-3} & \delta_{24} &= 0,4698 \cdot 10^{-3} & \delta_{34} &= 0,7800 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{44} &= 1,0876 \cdot 10^{-3} & \delta_{54} &= 1,1843 \cdot 10^{-3} & \delta_{64} &= 1,2596 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{74} &= 1,3350 \cdot 10^{-3} & \delta_{84} &= 1,4104 \cdot 10^{-3} & \delta_{94} &= 1,4863 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{104} &= 1,5617 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

5. $F = 1$ unit di tingkat 5 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{15} = 0,1877 \cdot 10^{-3} & \delta_{25} = 0,4807 \cdot 10^{-3} & \delta_{35} = 0,8165 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{45} = 1,1843 \cdot 10^{-3} & \delta_{55} = 1,5937 \cdot 10^{-3} & \delta_{65} = 1,7393 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{75} = 1,8637 \cdot 10^{-3} & \delta_{85} = 1,9894 \cdot 10^{-3} & \delta_{95} = 2,1144 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{105} = 2,2395 \cdot 10^{-3} & & \end{array}$$

6. $F = 1$ unit di tingkat 6 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{16} = 0,1869 \cdot 10^{-3} & \delta_{26} = 0,4917 \cdot 10^{-3} & \delta_{36} = 0,8531 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{46} = 1,2596 \cdot 10^{-3} & \delta_{56} = 1,7393 \cdot 10^{-3} & \delta_{66} = 2,2435 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{76} = 2,4787 \cdot 10^{-3} & \delta_{86} = 2,6940 \cdot 10^{-3} & \delta_{96} = 2,9092 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{106} = 3,1245 \cdot 10^{-3} & & \end{array}$$

7. $F = 1$ unit di tingkat 7 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{17} = 0,1863 \cdot 10^{-3} & \delta_{27} = 0,5026 \cdot 10^{-3} & \delta_{37} = 0,8902 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{47} = 1,3350 \cdot 10^{-3} & \delta_{57} = 1,8637 \cdot 10^{-3} & \delta_{67} = 2,4787 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{77} = 3,1142 \cdot 10^{-3} & \delta_{87} = 3,4802 \cdot 10^{-3} & \delta_{97} = 3,8263 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{107} = 4,1723 \cdot 10^{-3} & & \end{array}$$

8. $F = 1$ unit di tingkat 8 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{array}{lll} \delta_{18} = 0,1855 \cdot 10^{-3} & \delta_{28} = 0,5136 \cdot 10^{-3} & \delta_{38} = 0,9267 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{48} = 1,4104 \cdot 10^{-3} & \delta_{58} = 1,9894 \cdot 10^{-3} & \delta_{68} = 2,6940 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{78} = 3,4802 \cdot 10^{-3} & \delta_{88} = 4,2985 \cdot 10^{-3} & \delta_{98} = 4,8244 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{108} = 5,3406 \cdot 10^{-3} & & \end{array}$$

9. $F = 1$ unit di tingkat 9 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{19} &= 0,1848 \cdot 10^{-3} & \delta_{29} &= 0,5245 \cdot 10^{-3} & \delta_{39} &= 0,9638 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{49} &= 1,4863 \cdot 10^{-3} & \delta_{59} &= 2,1144 \cdot 10^{-3} & \delta_{69} &= 2,9092 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{79} &= 3,8263 \cdot 10^{-3} & \delta_{89} &= 4,8244 \cdot 10^{-3} & \delta_{99} &= 6,1011 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{109} &= 6,7915 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

10. $F = 1$ unit di tingkat 10 diperoleh simpangan tingkat sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \delta_{110} &= 0,1841 \cdot 10^{-3} & \delta_{210} &= 0,5354 \cdot 10^{-3} & \delta_{310} &= 1,0004 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{410} &= 1,5617 \cdot 10^{-3} & \delta_{510} &= 2,2395 \cdot 10^{-3} & \delta_{610} &= 3,1245 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{710} &= 4,1723 \cdot 10^{-3} & \delta_{810} &= 5,3406 \cdot 10^{-3} & \delta_{910} &= 6,7915 \cdot 10^{-3} \\ \delta_{1010} &= 9,5032 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

sehingga dapat dituliskan dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$[\delta] = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 0,1609 & 0,1897 & 0,1891 & 0,1884 & 0,1877 & 0,1869 & 0,1863 & 0,1855 & 0,1848 & 0,1841 \\ 0,1897 & 0,4183 & 0,4589 & 0,4698 & 0,4807 & 0,4917 & 0,5026 & 0,5136 & 0,5245 & 0,5354 \\ 0,1891 & 0,4589 & 0,7132 & 0,7800 & 0,8165 & 0,8531 & 0,8902 & 0,9267 & 0,9638 & 1,0004 \\ 0,1884 & 0,4698 & 0,7800 & 1,0876 & 1,1843 & 1,2596 & 1,3350 & 1,4104 & 1,4863 & 1,5617 \\ 0,1877 & 0,4807 & 0,8165 & 1,1843 & 1,5937 & 1,7393 & 1,8637 & 1,9894 & 2,1144 & 2,2395 \\ 0,1869 & 0,4917 & 0,8531 & 1,2596 & 1,7393 & 2,2435 & 2,4787 & 2,6940 & 2,9092 & 3,1245 \\ 0,1863 & 0,5026 & 0,8902 & 1,3350 & 1,8637 & 2,4787 & 3,1142 & 3,4802 & 3,8263 & 4,1723 \\ 0,1855 & 0,5136 & 0,9267 & 1,4104 & 1,9894 & 2,6940 & 3,4802 & 4,2985 & 4,8244 & 5,3406 \\ 0,1848 & 0,5245 & 0,9638 & 1,4863 & 2,1144 & 2,9092 & 3,8263 & 4,8244 & 6,1011 & 6,7915 \\ 0,1841 & 0,5354 & 1,0004 & 1,5617 & 2,2395 & 3,1245 & 4,1723 & 5,3406 & 6,7915 & 9,5032 \end{bmatrix}$$

setelah di inverse diperoleh matrik kekakuan tingkat sebagai berikut :

$$[K] = 10^3 \cdot \begin{bmatrix} 13,6865 & -7,5382 & 1,2233 & -0,1337 & 0,0350 & 0,0331 & -0,0062 & 0,0317 & 0,0151 & 0,0077 \\ -7,5382 & 12,6063 & -7,3230 & 1,0741 & -0,0484 & -0,0010 & 0,0368 & 0,0052 & 0,0214 & 0,0075 \\ 1,2233 & -7,3230 & 12,0287 & -6,3374 & 0,5454 & 0,0032 & -0,0151 & 0,0388 & 0,0142 & 0,0091 \\ -0,1337 & 1,0741 & -6,3374 & 9,6066 & -4,5485 & 0,3482 & -0,0333 & 0,0112 & -0,0046 & -0,0004 \\ 0,0350 & -0,0484 & 0,5454 & -4,5485 & 7,7589 & -4,2453 & 0,3844 & 0,0349 & 0,0616 & 0,0271 \\ 0,0331 & -0,0010 & 0,0033 & 0,3482 & -4,2453 & 7,6115 & -4,2151 & 0,3835 & 0,0614 & 0,0310 \\ 0,0062 & 0,0368 & -0,0150 & -0,0333 & 0,3844 & -4,2151 & 7,3599 & -3,7227 & 0,1602 & 0,0467 \\ 0,0317 & 0,0052 & 0,0388 & 0,0112 & 0,0349 & 0,3835 & -3,7227 & 5,2057 & -1,9201 & -0,0600 \\ 0,0151 & 0,0214 & 0,0141 & -0,0045 & 0,0615 & 0,0614 & 0,1602 & -1,9201 & 2,1810 & -0,5868 \\ 0,0077 & 0,0075 & 0,0092 & -0,0006 & 0,0271 & 0,0310 & 0,0467 & -0,0600 & -0,5868 & 0,5198 \end{bmatrix}$$

lalu didapatkan nilai kekakuan pada tiap tingkat sebagai berikut :

$$K_{10} = k_{10 \ 10} = 519,8 \text{ KN/cm}$$

$$K_9 = k_{9 \ 9} - K_{10} = 2181 - 519,8 \Rightarrow K_9 = 1661,2 \text{ KN/cm}$$

$$K_8 = k_{8 \ 8} - K_9 = 5205,7 - 1661,2 \Rightarrow K_8 = 3544,5 \text{ KN/cm}$$

$$K_7 = k_{7 \ 7} - K_8 = 7359,9 - 3544,5 \Rightarrow K_7 = 3815,4 \text{ KN/cm}$$

$$K_6 = k_{6 \ 6} - K_7 = 7611,5 - 3815,4 \Rightarrow K_6 = 3796,1 \text{ KN/cm}$$

$$K_5 = k_{5 \ 5} - K_6 = 7758,9 - 3796,1 \Rightarrow K_5 = 3962,8 \text{ KN/cm}$$

$$K_4 = k_{4 \ 4} - K_5 = 9606,6 - 3962,8 \Rightarrow K_4 = 5643,8 \text{ KN/cm}$$

$$K_3 = k_{3 \ 3} - K_4 = 12028,7 - 5643,8 \Rightarrow K_3 = 6384,9 \text{ KN/cm}$$

$$K_2 = k_{2 \ 2} - K_3 = 12606,3 - 6384,9 \Rightarrow K_2 = 6221,4 \text{ KN/cm}$$

$$K_1 = k_{1 \ 1} - K_2 = 13686,5 - 6221,4 \Rightarrow K_1 = 7465,1 \text{ KN/cm}$$

Tabel 3.19 Hasil-hasil Simulasi Model Struktur Portal
2 Tingkat Akibat Beban Gempa

Uraian	Lantai	MRF	CBF	EBF
Simpangan Tingkat (cm)	Atap	1.185	0.520	1.086
	1	0.591	0.266	0.567
Kekakuan Tingkat (KN/cm)	Atap	329.800	1389.700	632.400
	1	639.700	2320.100	985.600
Gaya Geser Dasar (KN)		-54.063	-138.144	-138.144
Waktu Getar Alami Gedung (dt)		0.612	0.257	0.373

Tabel 3.20 Hasil-hasil Simulasi Model Struktur Portal
4 Tingkat Akibat Beban Gempa

Uraian	Lantai	MRF	CBF	EBF
Simpangan Tingkat (cm)	Atap	3.456	1.705	2.682
	3	2.871	1.294	2.033
	2	1.963	0.803	1.329
	1	0.827	0.328	0.574
Kekakuan Tingkat (KN/cm)	Atap	478.300	2471.900	1007.500
	3	980.300	4749.000	2348.200
	2	720.400	2684.300	1813.100
1		1218.000	5012.800	2543.500
Gaya Geser Dasar (KN)		-109.757	-296.507	-280.034
Waktu Getar Alami Gedung (dt)		1.017	0.423	0.548

Keterangan :

MRF = Momen Resisting Frame (rangka penahan momen)

CBF = Centrally Braced Frame (rangka diperkaku konsentrik).

EBF = Eccentrically Braced Frame (rangka diperkaku eksentrik).

Tabel 3.21 Hasil-hasil Simulasi Model Struktur Portal
6 Tingkat Akibat Beban Gempa

Uraian	Lantai	MRF	CBF	EBF
Simpangan Tingkat (cm)	Atap	6.143	3.850	4.987
	5	5.520	3.110	3.987
	4	4.478	2.333	3.069
	3	3.412	1.619	2.204
	2	2.148	0.939	1.333
	1	0.836	0.365	0.536
Kekakuan Tingkat (KN/cm)	Atap	372.500	1592.100	627.500
	5	701.000	3464.500	1684.700
	4	1102.600	4686.800	3075.300
	3	1469.800	5510.100	3443.500
	2	1216.400	4971.100	3379.400
	1	1903.000	5886.000	3833.900
Gaya Geser Dasar (KN)		-154.384	-434.653	-397.754
Waktu Getar Alami Gedung (dt)		1.375	0.617	0.730

Keterangan :

MRF = Momen Resisting Frame (rangka penahan momen)

CBF = Centrally Braced Frame (rangka diperkaku konsentrik).

EBF = Eccentrically Braced Frame (rangka diperkaku eksentrik).

Tabel 3.22 Hasil-hasil Simulasi Model Struktur Portal
8 Tingkat Akibat Beban Gempa

Uraian	Lantai	MRF	CBF	EBF
Simpangan Tingkat (cm)	Atap	8.103	6.089	7.765
	7	7.634	5.798	6.569
	6	6.924	4.706	5.442
	5	5.911	3.613	4.269
	4	4.631	2.628	3.180
	3	3.389	1.771	2.197
	2	2.056	1.006	1.284
	1	0.768	0.383	0.496
Kekakuan Tingkat (KN/cm)	Atap	557.700	2628.600	898.600
	7	1241.600	5374.100	2714.000
	6	949.300	2842.200	2445.400
	5	1305.700	5538.600	2848.800
	4	1618.900	5080.100	4160.600
	3	2150.600	7712.900	4882.500
	2	1769.200	5553.000	4160.600
	1	2827.900	8409.500	6088.600
Gaya Geser Dasar (KN)		-190.541	-536.238	-485.816
Waktu Getar Alami Gedung (dt)		1.652	0.836	0.943

Keterangan :

MRF = Momen Resisting Frame (rangka penahan momen)

CBF = Centrally Braced Frame (rangka diperkaku konsentrik).

EBF = Eccentrically Braced Frame (rangka diperkaku eksentrik).