

BAB V

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1. Pendahuluan

Perhitungan dinamik dilakukan dengan menggunakan program ProgSIP 2001, yang dibuat dengan bahasa program Visual Basic 6. *Input* dalam program ProgSIP 2001 berupa massa, kekakuan, jumlah tingkat, dan tinggi tingkat. Perhitungan analisa dinamik pertama adalah menghitung *modeshape*, selanjutnya setelah *modeshape* didapat kemudian dilanjutkan dengan menghitung *modal effective mass*, *modal effective height*, *modal seismic force*, *modal shear force*, *modal overtuning moment*, *modal lateral displacement*, dan *modal story drift*. Setelah hitungan selesai, maka dibuat grafik. Dari grafik tersebut dapat dilihat prosentase *modal effective mass* pada gedung-gedung bertingkat banyak, batas mode yang mencapai prosentase 90 %.

5.2. Perhitungan Massa dan Kekakuan Struktur

5.2.1. Struktur dengan kekakuan berbeda

1. Struktur 6 lantai

Untuk massanya diambil dari Tugas Akhir Agung Febriarto dan Yesri Elrian, hasilnya dapat dilihat pada tabel 5.1 berikut :

Tabel 5.1 Hasil perhitungan massa pada struktur 6 lantai

No.	Lantai	Massa (kg. Det ² /cm)
1	1,2,3,4,5	64.5351
2	6	31.3866

Perhitungan kekakuan menggunakan prinsip *shear building* dimana kekakuan kolom tidak dipengaruhi oleh balok yang menghubungkan kolom-kolom yang ada. Kekakuan tiap kolom dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$K = \frac{12 * E * I}{H^3} \dots\dots\dots (5.1)$$

$$\text{Dengan } I = \frac{1}{12} * b * h^3 \dots\dots\dots (5.2)$$

Maka rumus untuk mencari kekakuan menjadi :

$$K = \frac{E * b * h^3}{H^3}, \text{ dengan nilai } E = 200000 \text{ kg/cm}^2, \text{ sehingga rumusnya dapat disederhanakan menjadi : } K = \frac{200000 * b * h^3}{H^3} \dots\dots\dots (5.3)$$

Dengan melihat data struktur maka kekakuan dihitung secara paralel yaitu kekakuan tiap lantai merupakan jumlah dari kekakuan kolom, kemudian hasil dari jumlah kekakuan kolom tersebut dikalikan dengan 0,75. Dengan memakai persamaan 5.3, maka kekakuan masing-masing kolom dapat dihitung.

$$KA_{1,2} = \frac{200000 * 40 * 60^3}{380^3} = 31491,471 \text{ kg/cm}$$

$$KA_{3,4} = \frac{200000 * 40 * 50^3}{380^3} = 18224,231 \text{ kg/cm}$$

$$KA_{5,6} = \frac{200000 * 40 * 40^3}{380^3} = 9330,806 \text{ kg/cm}$$

$$KB_{1,2} = \frac{200000 * 40 * 70^3}{380^3} = 50007,289 \text{ kg/cm}$$

$$KB_{3,4} = \frac{200000 * 40 * 50^3}{380^3} = 18224,231 \text{ kg/cm}$$

$$KB_{5,6} = \frac{200000 * 40 * 40^3}{380^3} = 9330,806 \text{ kg/cm}$$

Kekakuan masing-masing tingkat dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned} K_{1,2} &= 0.75 * ((2 * KA_1) + KB_1) = 0.75 * ((2 * 31491.471) + 50007.289) \\ &= 84742.674 \text{ kg/cm.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{3,4} &= 0.75 * ((2 * KA_3) + KB_3) = 0.75 * ((2 * 18224.231) + 18224.231) \\ &= 41004.519 \text{ kg/cm.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{5,6} &= 0.75 * ((2 * KA_5) + KB_5) = 0.75 * ((2 * 9330.806) + 9330.806) \\ &= 20994.314 \text{ kg/cm.} \end{aligned}$$

Selengkapnya hasil perhitungan kekakuan struktur disajikan pada tabel 5.2 berikut ini :

Tabel 5.2 Hasil perhitungan kekakuan pada struktur 6 lantai

No.	Lantai	Kekakuan (kg/cm)
1	1,2	84742.674
2	3,4	41004.519
3	5,6	20994.314

2. Struktur 12 lantai

Seperti halnya struktur 6 lantai, struktur 12 lantai massanya juga diambil dari Tugas Akhir Agung Febriarto dan Yesri Elrian, hasilnya dapat dilihat pada tabel 5.3 berikut :

Tabel 5.3 Hasil perhitungan massa pada struktur 12 lantai

No.	Lantai	Massa (kg. Det ² /cm)
1	1	97.27216
2	2,3,4	100.38139
3	5,6,7,8,9	97.27216
4	10,11	93.75739
5	12	60.59232

Dengan menggunakan persamaan 5.3, maka kekakuan untuk masing-masing kolom pada struktur 12 lantai dapat dihitung sebagai berikut :

$$KA_{1,2,3,4} = \frac{200000 * 50 * 70^3}{390^3} = 57822.957 \text{ kg/cm}$$

$$KA_{5,6,7,8} = \frac{200000 * 50 * 60^3}{390^3} = 36413.291 \text{ kg/cm}$$

$$KA_{9,10,11,12} = \frac{200000 * 50 * 50^3}{390^3} = 21072.506 \text{ kg/cm}$$

$$KB_{1,2,3,4} = \frac{200000 * 50 * 80^3}{390^3} = 86312.986 \text{ kg/cm}$$

$$KB_{5,6,7,8} = \frac{200000 * 50 * 60^3}{390^3} = 36413.291 \text{ kg/cm}$$

$$KB_{9,10,11,12} = \frac{200000 * 50 * 50^3}{390^3} = 21072.506 \text{ kg/cm}$$

Kekakuan masing-masing tingkat dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned} K_{1,2,3,4} &= 0.75 * ((2 * KA_1) + KB_1) = 0.75 * ((2 * 57822.957) + 86312.986) \\ &= 151469.175 \text{ kg/cm.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{5,6,7,8} &= 0.75 * ((2 * KA_5) + KB_5) = 0.75 * ((2 * 36413.291) + 36413.291) \\ &= 81929.905 \text{ kg/cm.} \end{aligned}$$

$$K_{9,10,11,12} = 0.75 * ((2 * K_{A9}) + K_{B9}) = 0.75 * (2 * 21072.506) + 21072.506) \\ = 47413.1385 \text{ kg/cm.}$$

Selengkapnya hasil perhitungan kekakuan struktur disajikan pada tabel 5.4 berikut ini :

Tabel 5.4 Hasil perhitungan kekakuan pada struktur 12 lantai

No.	Lantai	Kekakuan (kg/cm)
1	1,2,3,4	151469.175
2	5,6,7,8	81929.905
3	9,10,11,12	47413.1385

3. Struktur 18 lantai

Seperti halnya struktur 6 lantai dan struktur struktur 12, struktur 18 lantai massanya juga diambil dari Tugas Akhir Agung Febriarto dan Yesri Elrian, hasilnya dapat dilihat pada tabel 5.5 berikut :

Tabel 5.5 Hasil perhitungan massa pada struktur 18 lantai

No.	Lantai	Massa (kg. Det ² /cm)
1	1	129.716245
2	2,3,4,5,6	136.20506
3	7,8,9,10,11	129.716245
4	12,13,14,15,16,17	122.145959
5	18	80.3294280

Dengan menggunakan persamaan 5.3, maka kekakuan untuk masing-masing kolom pada struktur 18 lantai dapat dihitung sebagai berikut :

$$K_{A1,2,3,4,5,6} = \frac{200000 * 90 * 90^3}{380^3} = 239138.3584 \text{ kg/cm}$$

$$K_{A7,8,9,10,11,12} = \frac{200000 * 80 * 90^3}{380^3} = 212567.429 \text{ kg/cm}$$

$$KA_{13,14,15,16,17,18} = \frac{200000 * 80 * 80^3}{380^3} = 149292.899 \text{ kg/cm}$$

$$KB_{1,2,3,4,5,6} = \frac{200000 * 90 * 100^3}{380^3} = 328036.157 \text{ kg/cm}$$

$$KB_{7,8,9,10,11,12} = \frac{200000 * 80 * 90^3}{380^3} = 212567.429 \text{ kg/cm}$$

$$KB_{13,14,15,16,17,18} = \frac{200000 * 80 * 80^3}{380^3} = 149292.899 \text{ kg/cm}$$

Kekakuan masing-masing tingkat dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned} K_{1,2,3,4,5,6} &= 0.75 * ((2 * KA_1) + KB_1) = 0.75 * ((2 * 239138.3584) + 328036.157) \\ &= 604734.656 \text{ kg/cm.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{7,8,9,10,11,12} &= 0.75 * ((2 * KA_7) + KB_7) = 0.75 * ((2 * 212567.429) + 212567.429) \\ &= 478276.717 \text{ kg/cm.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{13,14,15,16,17,18} &= 0.75 * ((2 * KA_{13}) + KB_{13}) = 0.75 * ((2 * 149292.899) \\ &+ 149292.899) = 335909.024 \text{ kg/cm.} \end{aligned}$$

Selengkapnya hasil perhitungan kekakuan struktur disajikan pada tabel 5.6 berikut ini :

Tabel 5.6 Hasil perhitungan kekakuan pada struktur 18 lantai

No.	Lantai	Kekakuan (kg/cm)
1	1,2,3,4,5,6	604734.656
2	7,8,9,10,11,12	478276.717
3	13,14,15,16,17,18	335909.024

4. Struktur 20 lantai

Untuk struktur 20 lantai sampai 100 lantai, massa dan kekakuannya dihitung secara ekstrapolasi berdasarkan data struktur 6, 12, dan 18 lantai. Massa dan kekakuan struktur 20 lantai dapat dilihat pada tabel 5.7 dibawah ini :

Tabel 5.7 Hasil perhitungan massa pada struktur 20 lantai

No.	Lantai	Massa (kg. Det ² /cm)
1	1	140.53094
2	2,3,4,5,6,7	148.1463
3	8 sampai 15	140.53094
4	16 sampai 19	131.0230
5	20	86.90850

Tabel 5.8 Hasil perhitungan kekakuan pada struktur 20 lantai

No.	Lantai	Kekakuan (kg/cm)
1	1 sampai 7	470232.618
2	8 sampai 13	491918.512
3	14 sampai 20	258536.474

5. Struktur 25 lantai

Tabel 5.9 Hasil perhitungan massa pada struktur 25 lantai

No.	Lantai	Massa (kg. Det ² /cm)
1	1	167.5677
2	2 sampai 8	177.9993
3	9 sampai 19	167.5677
4	20 sampai 24	155.2660
5	25	103.3561



Tabel 5.10 Hasil perhitungan kekakuan pada struktur 25 lantai

No.	Lantai	Kekakuan (kg/cm)
1	1 sampai 8	1133544.380
2	9 sampai 17	940681.331
3	18 sampai 25	672487.557

6. Struktur 30 lantai

Tabel 5.11 Hasil perhitungan massa pada struktur 30 lantai

No.	Lantai	Massa (kg. Det ² /cm)
1	1	194.6044
2	2 sampai 10	207.8524
3	11 sampai 21	194.6044
4	22 sampai 29	175.4083
5	30	119.8036

Tabel 5.12 Hasil perhitungan kekakuan pada struktur 30 lantai

No.	Lantai	Kekakuan (kg/cm)
1	1 sampai 10	1413737.965
2	11 sampai 20	1141749.346
3	21 sampai 30	809525.632

7. Struktur 35 lantai

Tabel 5.13 Hasil perhitungan massa pada struktur 35 lantai

No.	Lantai	Massa (kg. Det ² /cm)
1	1	221.6412
2	2 sampai 13	237.7054
3	14 sampai 28	221.6412
4	29 sampai 34	202.5802
5	35	136.2512

Tabel 5.14 Hasil perhitungan kekakuan pada struktur 35 lantai

No.	Lantai	Kekakuan (kg/cm)
1	1 sampai 12	1888986.852
2	13 sampai 24	1601259.351
3	25 sampai 26	1153314.033

8. Struktur 40 lantai**Tabel 5.15** Hasil perhitungan massa pada struktur 40 lantai

No.	Lantai	Massa (kg. Det ² /cm)
1	1	248.6779
2	2 sampai 13	267.5585
3	14 sampai 28	248.6779
4	29 sampai 39	219.7936
5	40	152.6988

Tabel 5.16 Hasil perhitungan kekakuan pada struktur 40 lantai

No.	Lantai	Kekakuan (kg/cm)
1	1 sampai 13	1493630.125
2	14 sampai 25	1220705.507
3	26 sampai 40	869573.149

9. Struktur 45 lantai**Tabel 5.17** Hasil perhitungan massa pada struktur 45 lantai

No.	Lantai	Massa (kg. Det ² /cm)
1	1	275.7150
2	2 sampai 12	297.4116
3	13 sampai 34	275.7150
4	35 sampai 44	249.8950
5	45	169.1464

Tabel 5.18 Hasil perhitungan kekakuan pada struktur 45 lantai

No.	Lantai	Kekakuan (kg/cm)
1	1 sampai 15	2644429.320
2	16 sampai 30	2261837.371
3	31 sampai 45	1634140.509

10. Struktur 50 lantai

Tabel 5.19 Hasil perhitungan massa pada struktur 50 lantai

No.	Lantai	Massa (kg. Det ² /cm)
1	1	302.7514
2	2 sampai 17	327.2646
3	18 sampai 35	302.7514
4	36 sampai 49	264.1789
5	50	185.5940

Tabel 5.20 Hasil perhitungan kekakuan pada struktur 50 lantai

No.	Lantai	Kekakuan (kg/cm)
1	1 sampai 16	2569275.702
2	17 sampai 32	2113465.339
3	33 sampai 50	1509336.099

11. Struktur 60 lantai

Tabel 5.21 Hasil perhitungan massa pada struktur 60 lantai

No.	Lantai	Massa (kg. Det ² /cm)
1	1	356.8248
2	2 sampai 20	386.9708
3	21 sampai 41	356.8248
4	42 sampai 59	308.5642
5	60	218.4892

Tabel 5.22 Hasil perhitungan kekakuan pada struktur 60 lantai

No.	Lantai	Kekakuan (kg/cm)
1	1 sampai 20	2360283.428
2	21 sampai 40	1949492.502
3	41 sampai 60	1394430.999

12. Struktur 80 lantai

Tabel 5.23 Hasil perhitungan massa pada struktur 80 lantai

No.	Lantai	Massa (kg. Det ² /cm)
1	1	464.9718
2	2 sampai 27	506.3830
3	28 sampai 55	464.9718
4	56 sampai 79	397.3349
5	80	284.2795

Tabel 5.24 Hasil perhitungan kekakuan pada struktur 80 lantai

No.	Lantai	Kekakuan (kg/cm)
1	1 sampai 27	3226936.500
2	28 sampai 58	2678279.497
3	59 sampai 80	1919288.849

13. Struktur 100 lantai

Tabel 5.25 Hasil perhitungan massa pada struktur 100 lantai

No.	Lantai	Massa (kg. Det ² /cm)
1	1	573.1187
2	2 sampai 33	625.7952
3	34 sampai 67	573.1187
4	68 sampai 99	486.1055
5	100	350.0699

Tabel 5.26 Hasil perhitungan kekakuan pada struktur 100 lantai

No.	Lantai	Kekakuan (kg/cm)
1	1 sampai 33	4093590.030
2	34 sampai 66	3407066.490
3	67 sampai 100	2444146.700

5.2.2. Struktur dengan kekakuan sama

Untuk struktur dengan kekakuan sama, massanya diambil sama dengan struktur yang kekakuannya berbeda. Sedangkan kekakuannya diambil sama seperti kekakuan pada lantai 1 untuk masing-masing struktur.

1. Struktur 6 lantai

Untuk struktur 6 lantai kekakuannya diambil :

$$K_{1,2,3,4,5,6} = 84742.674 \text{ kg/cm.}$$

2. Struktur 12 lantai

Untuk struktur 12 lantai kekakuannya diambil :

$$K_{1 \text{ sampai } 12} = 151469.175 \text{ kg/cm.}$$

3. Struktur 18 lantai

Untuk struktur 18 lantai kekakuannya diambil :

$$K_{1 \text{ sampai } 18} = 604734.656 \text{ kg/cm.}$$

4. Struktur 20 lantai

Untuk struktur 20 lantai kekakuannya diambil :

$$K_{1 \text{ sampai } 20} = 470232.618 \text{ kg/cm.}$$

5. Struktur 25 lantai

Untuk struktur 25 lantai kekakuannya diambil :

$$K_{1 \text{ sampai } 25} = 1133544.380 \text{ kg/cm.}$$

6. Struktur 30 lantai

Untuk struktur 30 lantai kekakuannya diambil :

$$K_1 \text{ sampai } 30 = 1413737.965 \text{ kg/cm.}$$

7. Struktur 35 lantai

Untuk struktur 35 lantai kekakuannya diambil :

$$K_1 \text{ sampai } 35 = 1888986.852 \text{ kg/cm.}$$

8. Struktur 40 lantai

Untuk struktur 40 lantai kekakuannya diambil :

$$K_1 \text{ sampai } 40 = 1493630.125 \text{ kg/cm.}$$

9. Struktur 45 lantai

Untuk struktur 45 lantai kekakuannya diambil :

$$K_1 \text{ sampai } 45 = 2644429.320 \text{ kg/cm.}$$

10. Struktur 50 lantai

Untuk struktur 50 lantai kekakuannya diambil :

$$K_1 \text{ sampai } 50 = 2569275.702 \text{ kg/cm.}$$

11. Struktur 60 lantai

Untuk struktur 60 lantai kekakuannya diambil :

$$K_1 \text{ sampai } 60 = 2360283.428 \text{ kg/cm.}$$

12. Struktur 80 lantai

Untuk struktur 80 lantai kekakuannya diambil :

$$K_1 \text{ sampai } 80 = 3226936.500 \text{ kg/cm.}$$

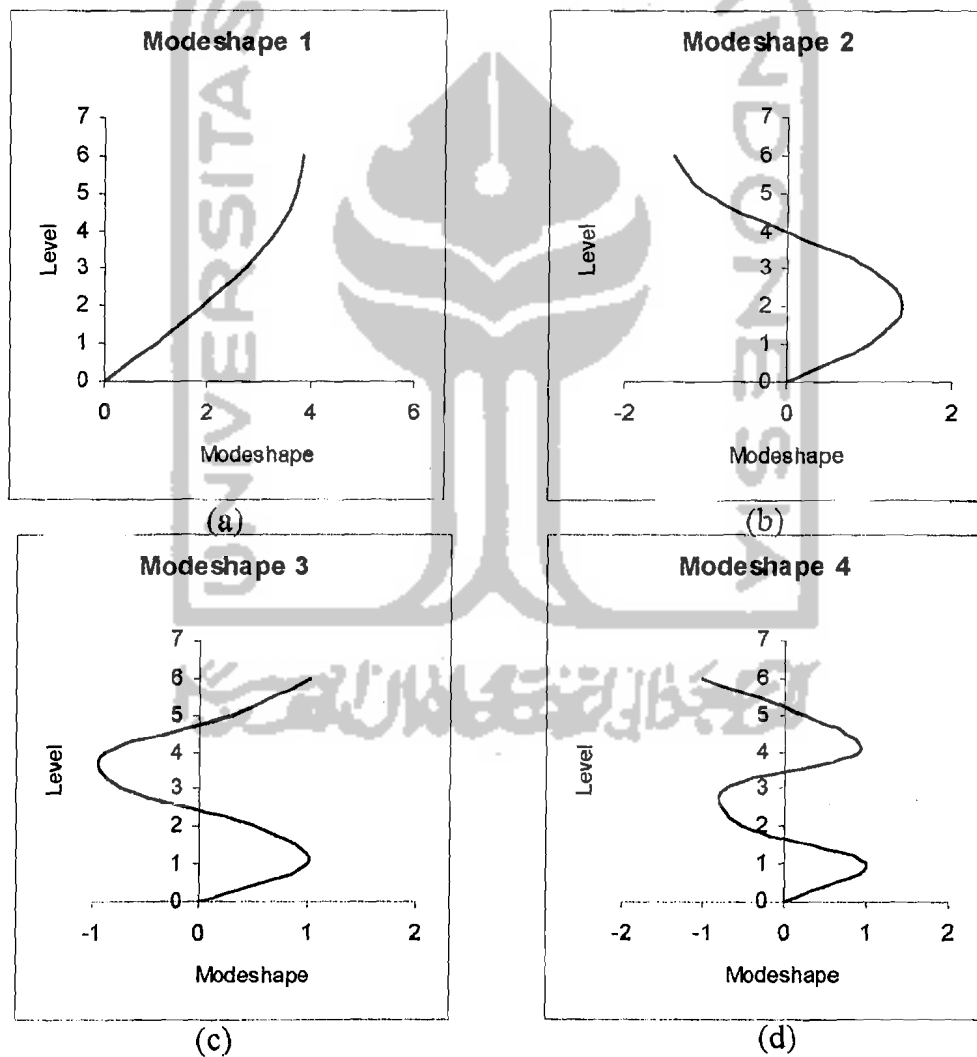
13. Struktur 100 lantai

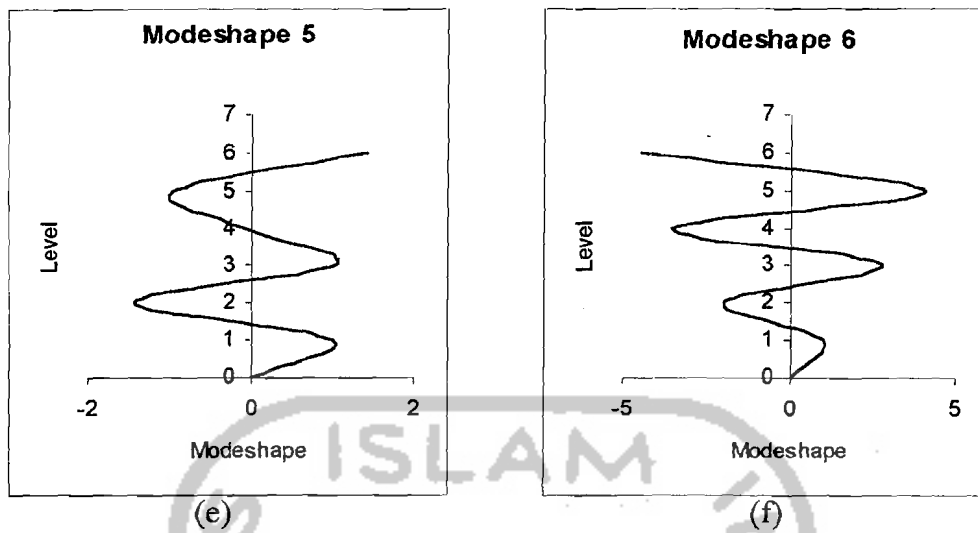
Untuk struktur 100 lantai kekakuannya diambil :

K 1 sampai 100 = 4093590.030 kg/cm.

5.3. Perhitungan *Modeshape*

Perhitungan *modeshape* dipakai metode Jacobi, contoh grafik *modeshape* untuk struktur 6 lantai dapat dilihat dibawah ini :





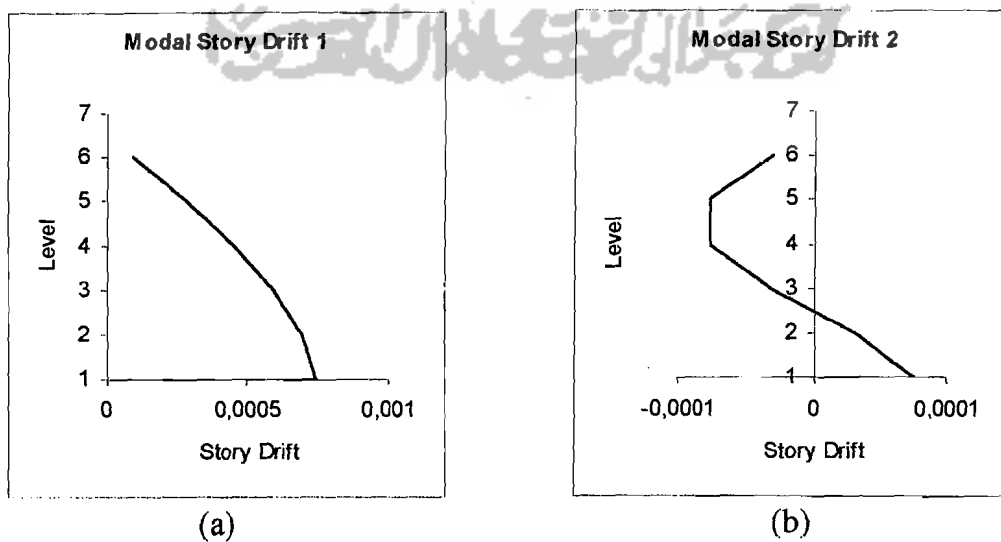
Gambar 5.1 Grafik Modeshape 6 Tingkat

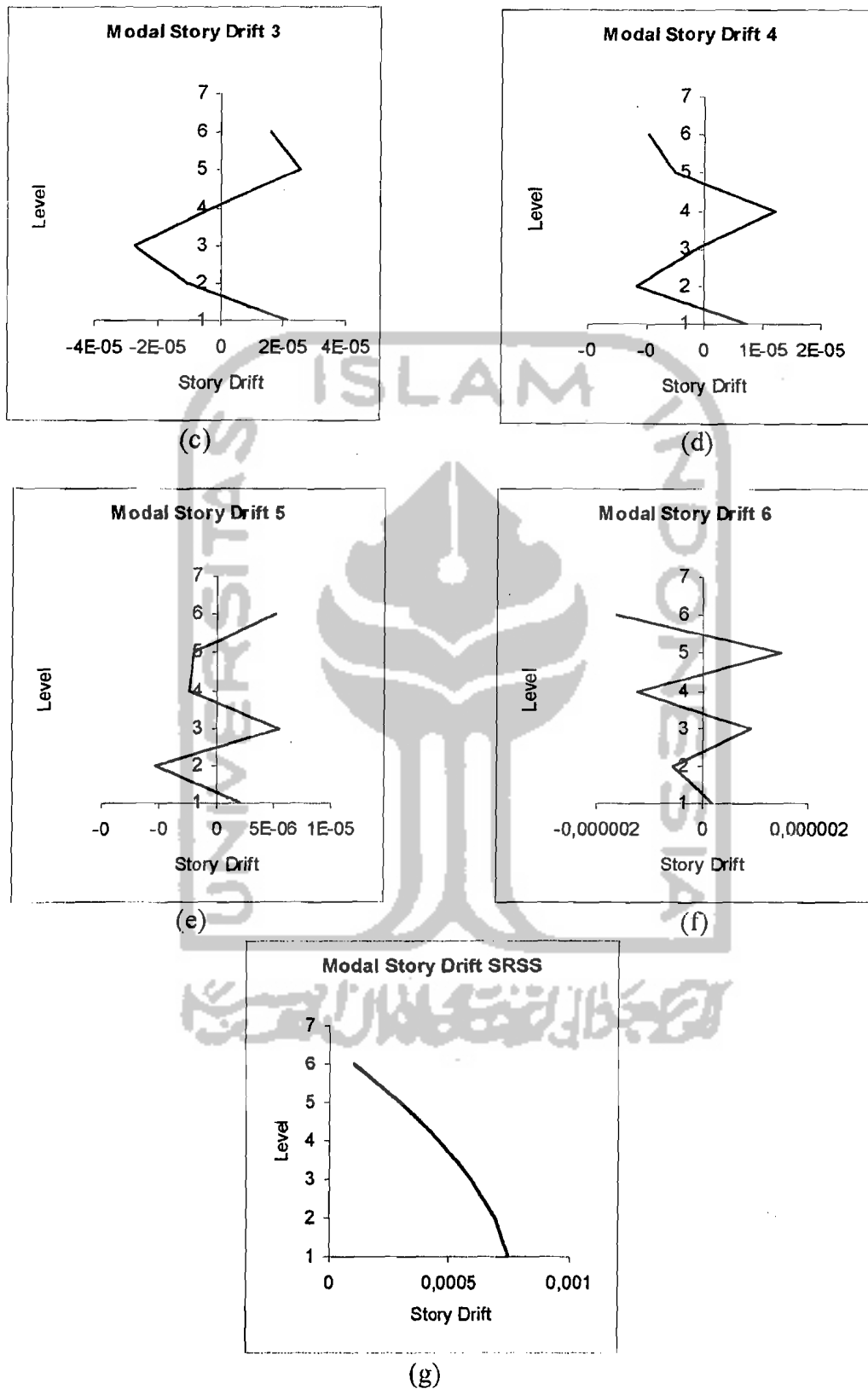
5.4. Perhitungan *Modal Story Drift*

Modal story drift didapat dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\Delta_{im} = \frac{V_{im}}{0,9Kk_i} \dots \dots \dots (5.4)$$

Berikut ini grafik *modal story drift* untuk struktur 6 lantai.





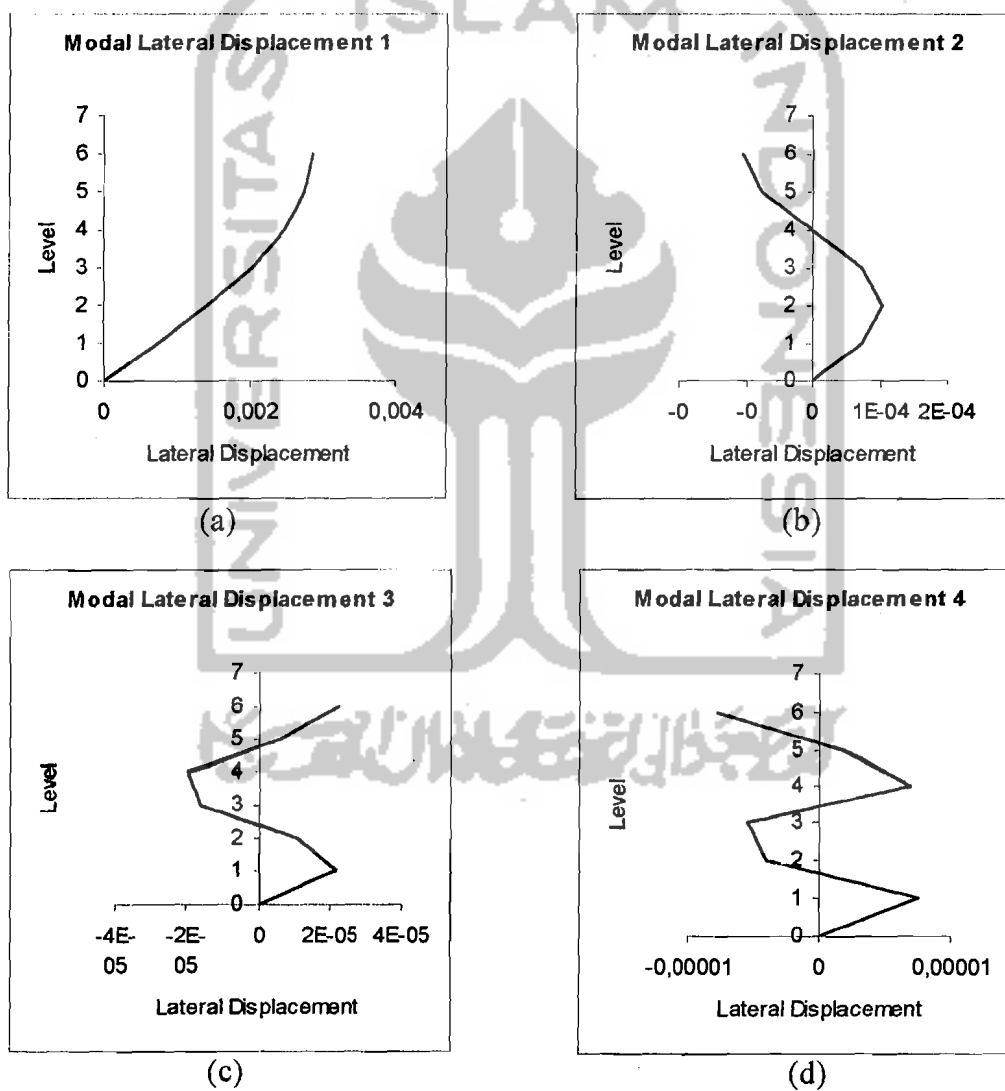
Gambar 5.2 Grafik Modal Story Drift 6 Tingkat

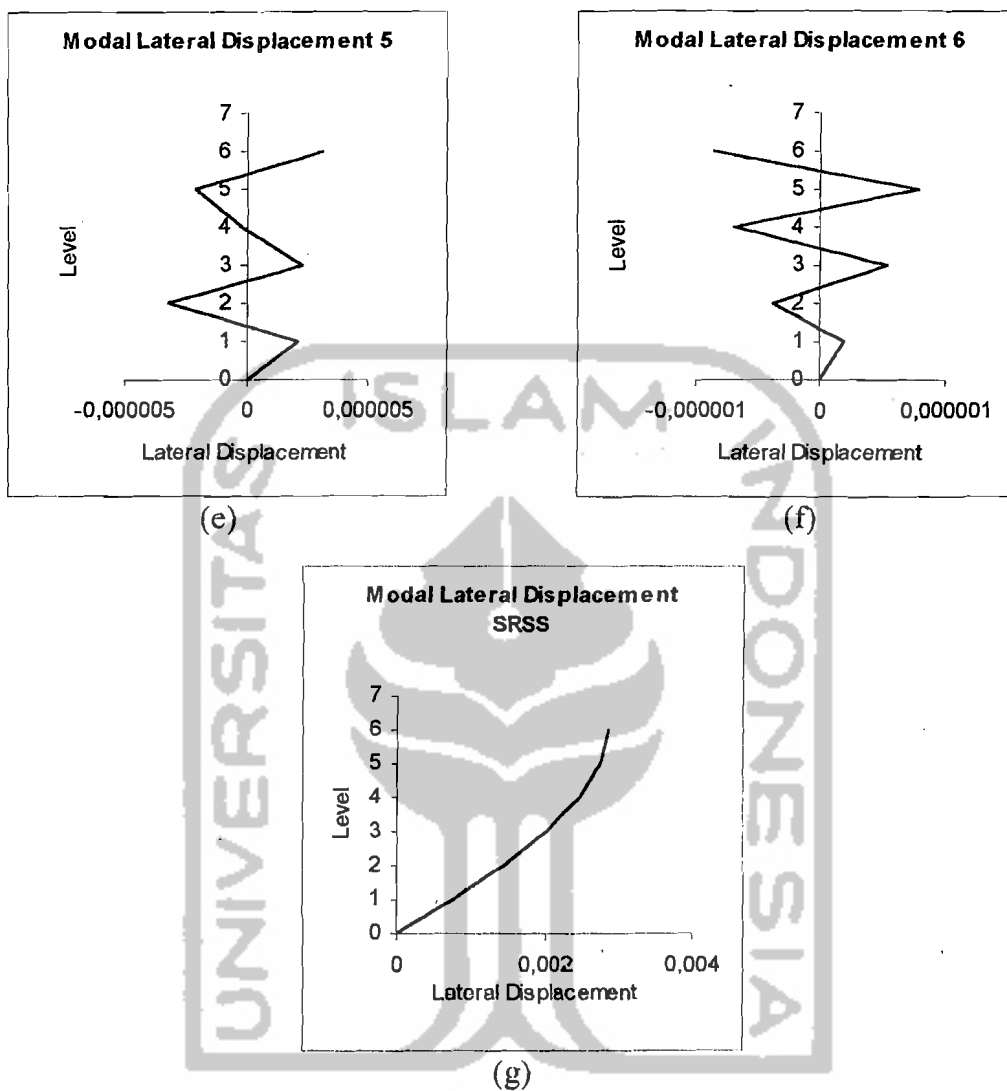
5.5. Perhitungan *Modal lateral displacement*

Modal lateral displacement didapat dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$d_m = \sum_{j=1}^i \Delta_{jm} \dots \dots \dots (5.5)$$

Berikut ini grafik *modal lateral displacement* untuk struktur 6 lantai.





Gambar 5.3 Grafik Modal Lateral Displacement 6 Tingkat

5.6. Perhitungan Modal Seismic Force (F_{im})

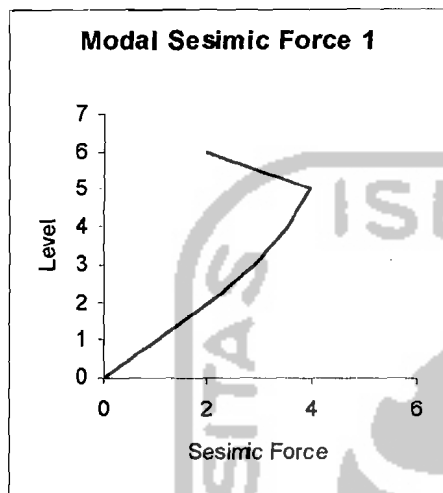
Modal seismic force di tingkat i ditentukan dengan rumus :

$$F_{im} = C_{im} V_m \dots \dots \dots (5.6)$$

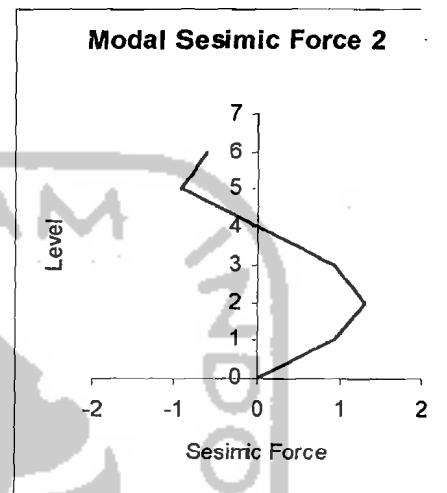
Dimana C_{im} adalah koefisien modal gempa di tingkat i yang diperoleh dari :

$$C_{im} = \frac{\phi_{im} W_i}{\sum_{j=1}^N \phi_{jm} W_j} \dots \dots \dots (5.7)$$

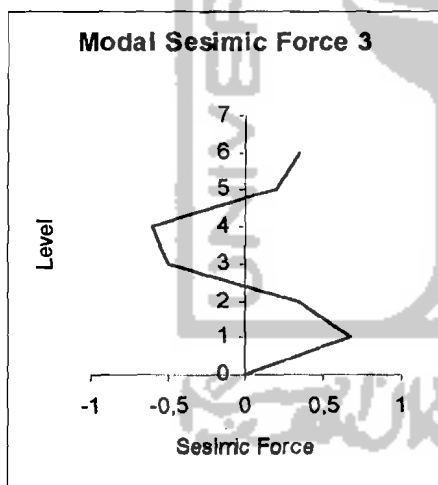
Berikut ini grafik modal seismic force untuk struktur 6 lantai.



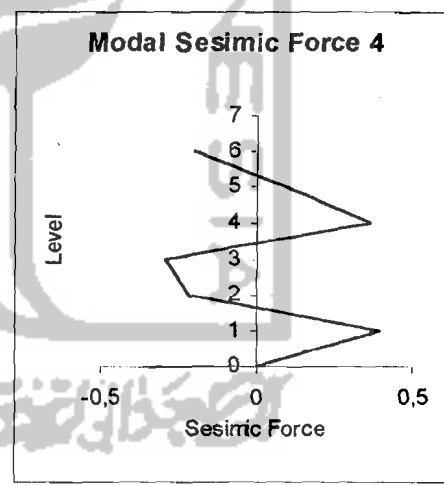
(a)



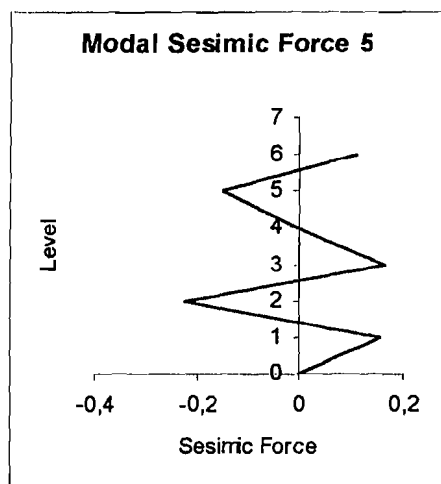
(b)



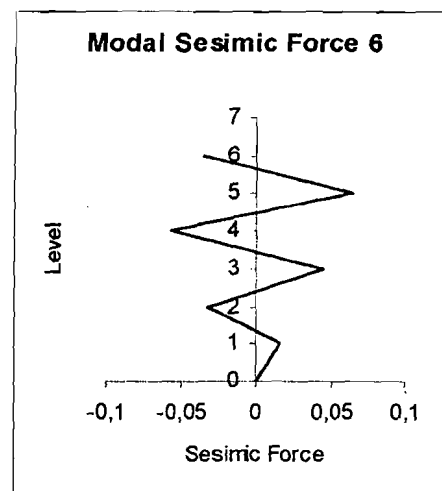
(c)



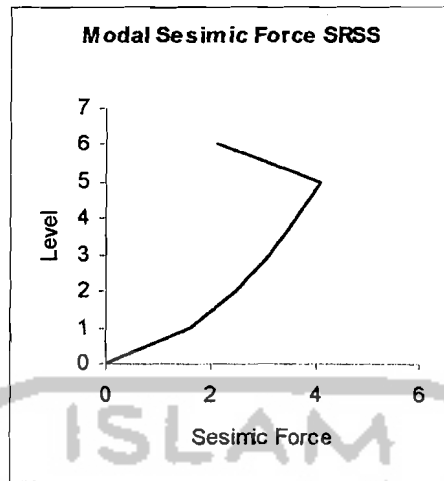
(d)



(e)



(f)



(g)

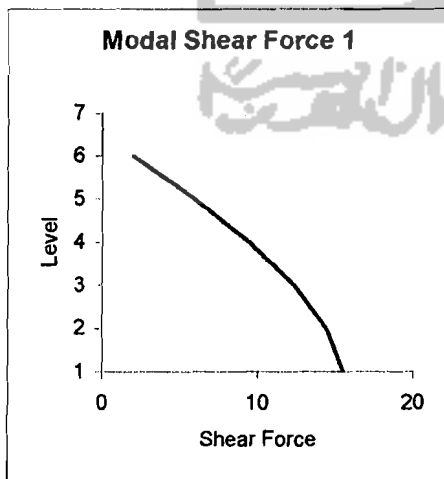
Gambar 5.4 Grafik Modal Seismic Force 6 Tingkat

5.7. Perhitungan modal shear force

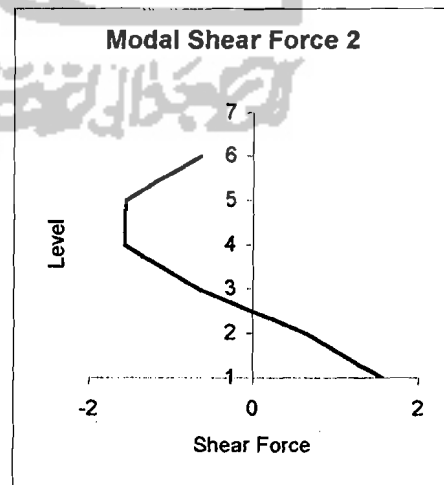
Modal shear force didapat dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$V_{im} = \sum_{j=1}^N F_{jm} \dots \dots \dots (5.8)$$

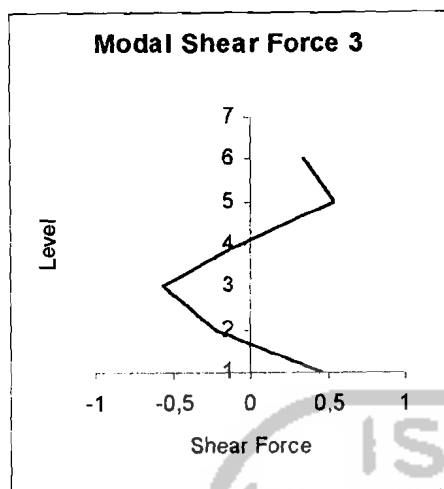
Berikut ini grafik modal shear force untuk struktur 6 lantai.



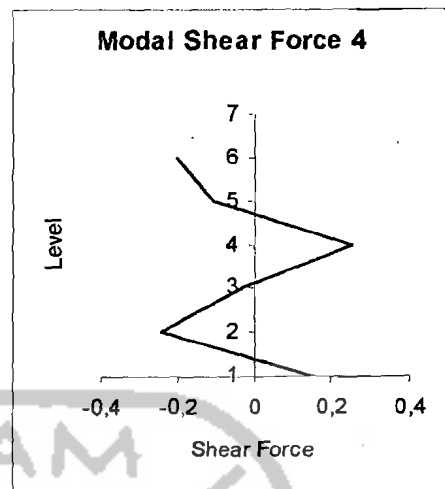
(a)



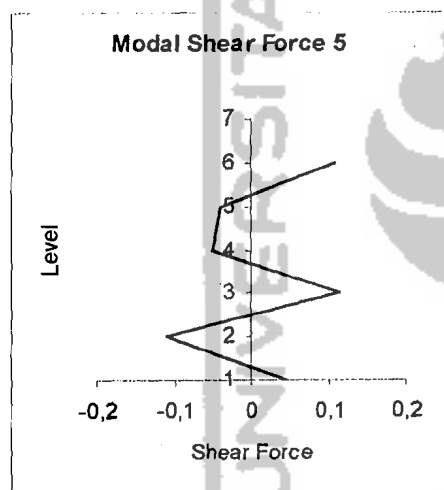
(b)



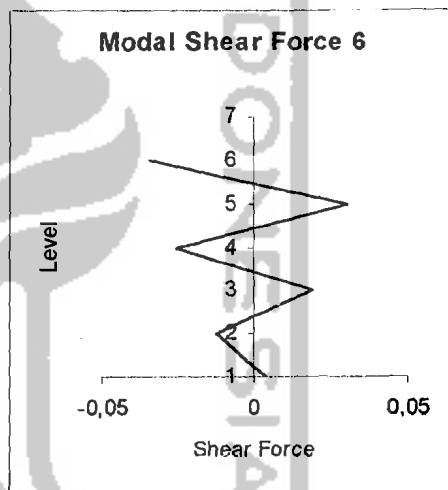
(c)



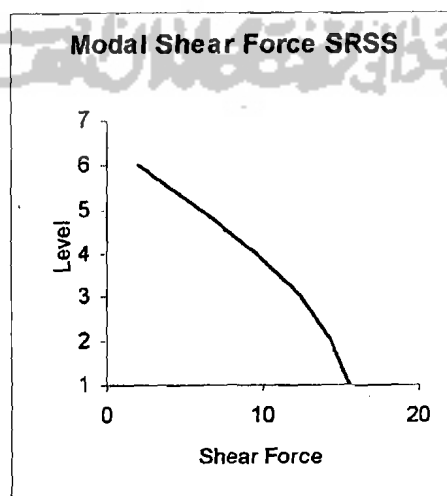
(d)



(e)



(f)



(g)

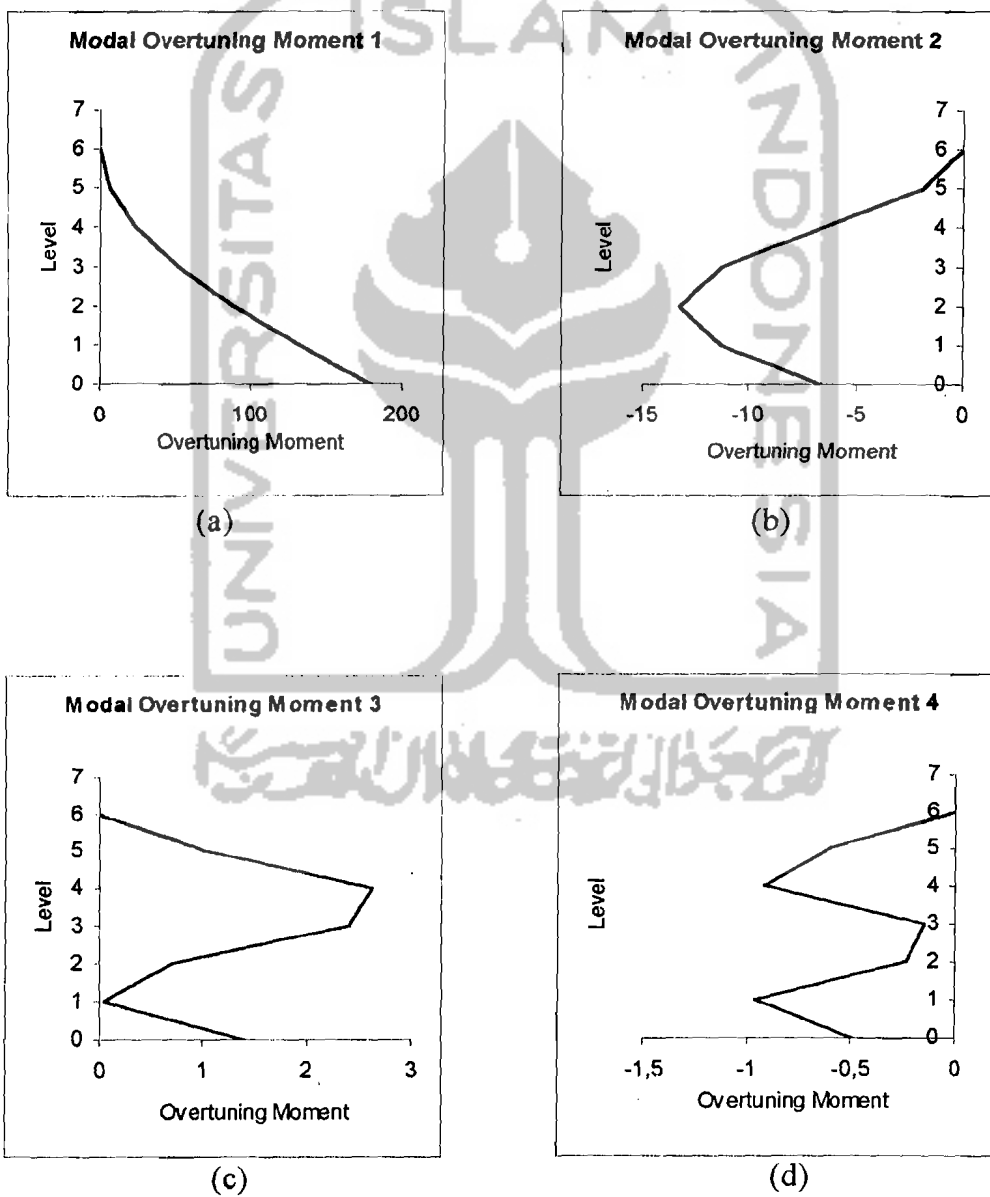
Gambar 5.5 Grafik Modal Shear Force 6 Tingkat

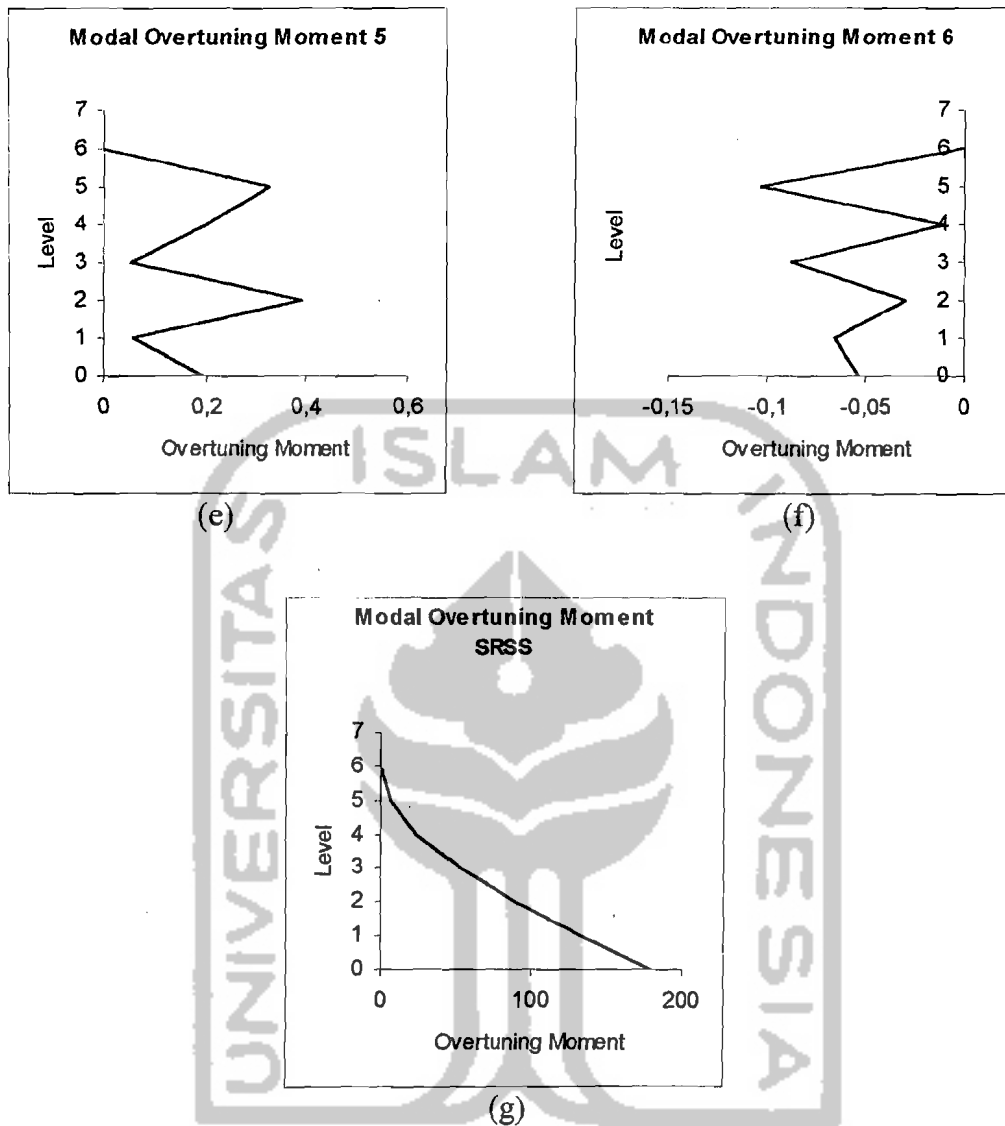
5.8. Perhitungan Modal Overtuning Moment

Modal overtuning moment didapat dengan menggunakan rumus sebagai berikut

$$M_i = \sum_{j=i+1}^N F_j (h_j - h_i) \dots\dots\dots (5.9)$$

Berikut ini grafik modal overtuning moment untuk struktur 6 lantai.





Gambar 5.6 Grafik Modal Overturning Moment 6 Tingkat

5.9. Perhitungan modal effective mass

Modal effective mass dicari dengan rumus sebagai berikut :

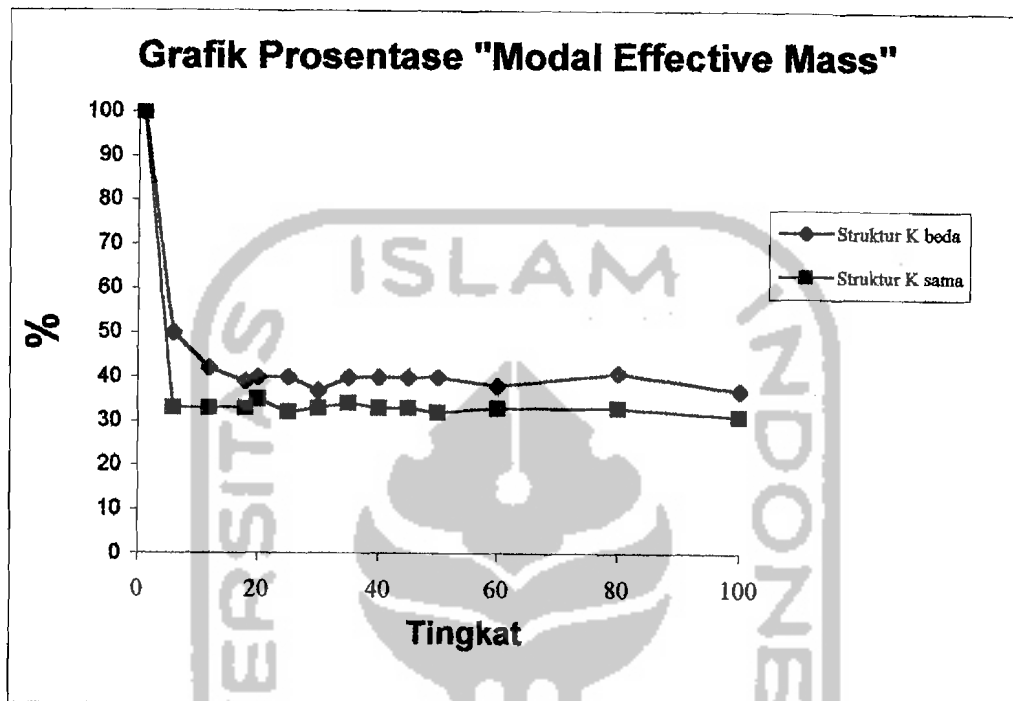
$$M_m = \frac{\left[\sum_{i=1}^N \phi_{im} M_i \right]^2}{\sum_{i=1}^N \phi_{im}^2 M_i} \dots \dots \dots (5.10)$$

Berikut ini dapat dilihat grafik plot antara jumlah tingkat dengan jumlah mode yang mencapai prosentase M_m 90 %, disini dipakai struktur 6 sampai 100 tingkat, untuk struktur dengan kekakuan berbeda dan kekakuan yang sama. Data prosentase M_m yang mencapai 90% dapat dilihat pada tabel 5.27 di bawah ini.

Tabel 5.27 Prosentase Modal Effective Mass (MEM)

Jumlah Tingkat	Batas Mode Mencapai MEM 90 %			
	Struktur K berbeda		Struktur K sama	
	Mode	%	Mode	%
1	1	100	1	100
6	3	50	2	33
12	4	42	4	33
18	7	39	6	33
20	9	40	7	35
25	10	40	8	32
30	11	37	10	33
35	14	40	12	34
40	16	40	13	33
45	18	40	15	33
50	20	40	16	32
60	23	38	20	33
80	33	41	26	33
100	37	37	31	31

Kemudian dari hasil di atas dibuat grafik, dan hasilnya dapat dilihat pada gambar 5.7 di bawah ini :



Gambar 5.7 Grafik Modal Effective Mass

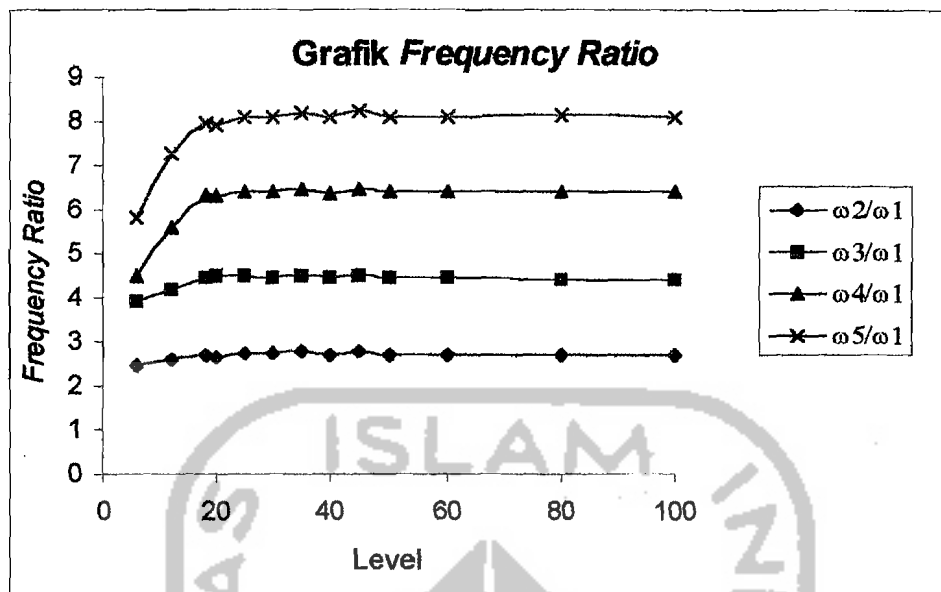
Setelah grafik *Modal Effective Mass* didapat, kemudian dihitung *frequency ratio* yaitu perbandingan antara ω_2 sampai ω_5 dengan ω_1 untuk struktur dengan kekakuan sama dan struktur dengan kekakuan berbeda. Hasilnya dapat dilihat pada tabel 5.28 dan tabel 5.29, dari data hasil tersebut kemudian dibuat grafik, dan hasilnya seperti pada gambar 5.8 dan gambar 5.9.

Tabel 5.28 *Frequency Ratios* Struktur dengan Kekakuan Berbeda

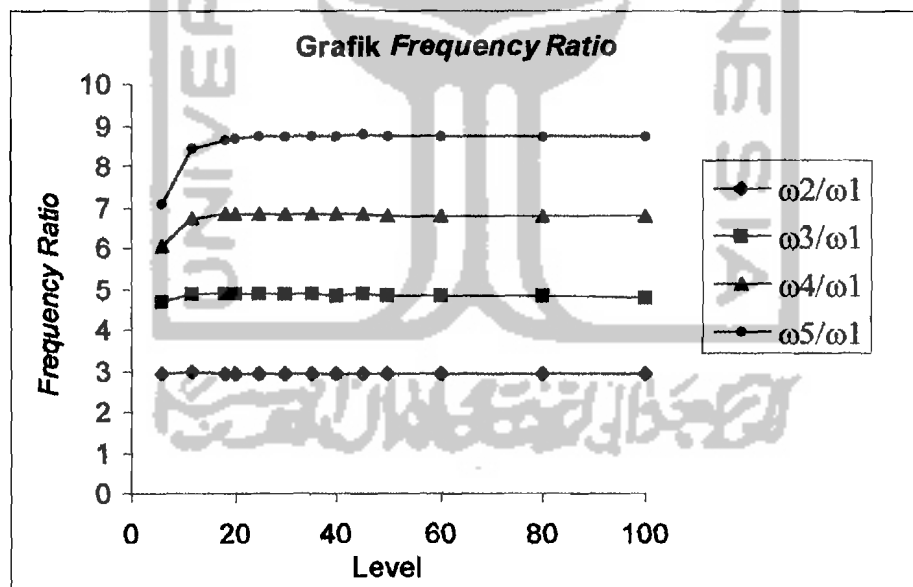
Tingkat	ω_2/ω_1	ω_3/ω_1	ω_4/ω_1	ω_5/ω_1
6	2,46	3,90	4,50	5,80
12	2,57	4,19	5,60	7,27
18	2,70	4,45	6,30	7,95
20	2,64	4,50	6,30	7,90
25	2,75	4,50	6,40	8,10
30	2,71	4,45	6,40	8,10
35	2,76	4,50	6,46	8,18
40	2,70	4,45	6,37	8,10
45	2,76	4,52	6,46	8,22
50	2,70	4,45	6,40	8,11
60	2,70	4,44	6,40	8,10
80	2,70	4,43	6,41	8,12
100	2,70	4,43	6,40	8,10

Tabel 5.29 *Frequency Ratios* Struktur dengan Kekakuan Sama

Tingkat	ω_2/ω_1	ω_3/ω_1	ω_4/ω_1	ω_5/ω_1
6	2,93	4,66	6,07	7,07
12	2,96	4,87	6,72	8,44
18	2,94	4,87	6,81	8,63
20	2,95	4,89	6,81	8,68
25	2,95	4,89	6,83	8,74
30	2,94	4,86	6,82	8,74
35	2,95	4,90	6,84	8,75
40	2,93	4,84	6,81	8,74
45	2,95	4,87	6,83	8,80
50	2,93	4,83	6,80	8,74
60	2,92	4,82	6,80	8,73
80	2,91	4,81	6,79	8,72
100	2,91	4,80	6,79	8,71



Gambar 5.8 Grafik *Frequency Ratio* Struktur dengan kekakuan berbeda

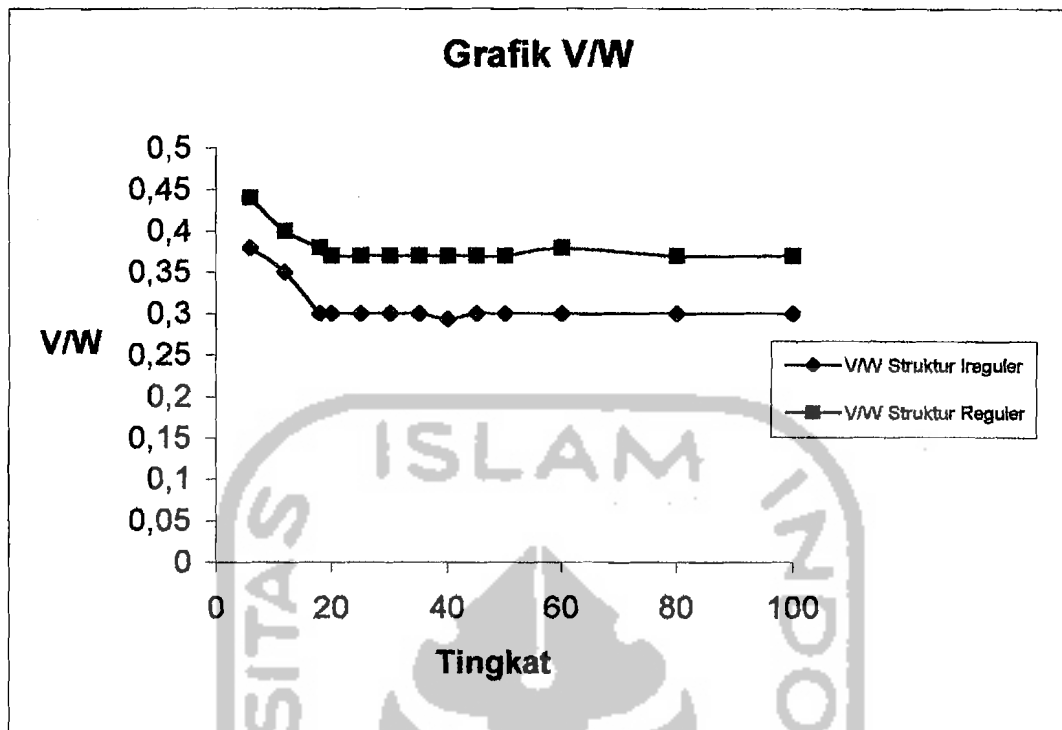


Gambar 5.9 Grafik *Frequency Ratio* Struktur dengan kekakuan sama

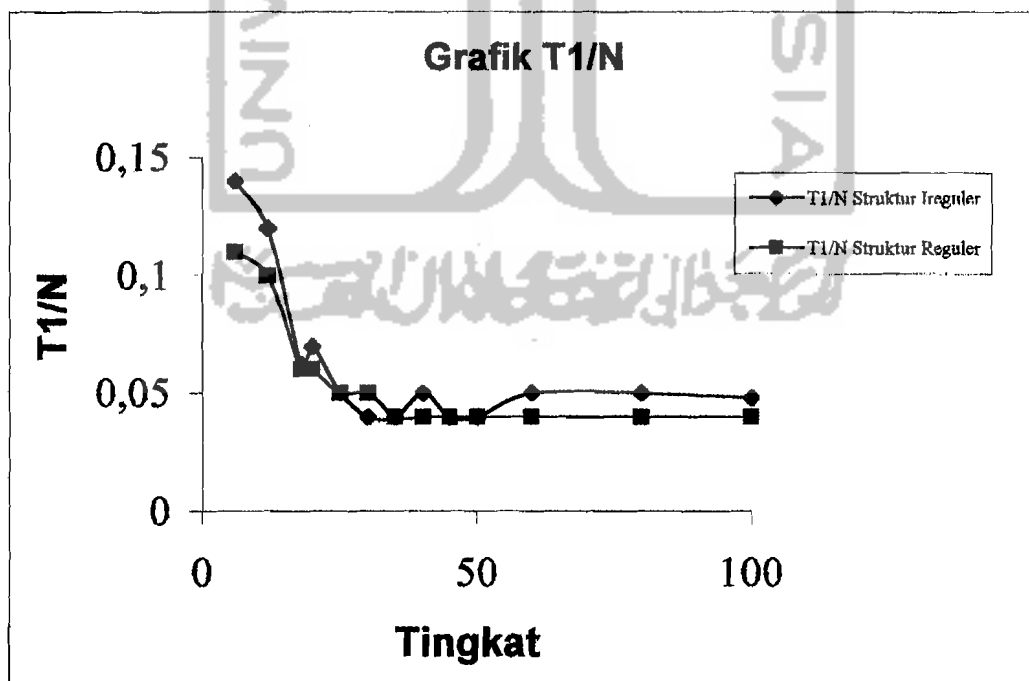
Setelah *frequency ratio* didapat, kemudian dihitung juga perbandingan antara gaya geser lantai dasar (V_1) dengan berat gedung (W_{total}) dan perbandingan antara *natural periods 1* (T_1) dengan jumlah tingkat gedung. Hasil perhitungannya dapat dilihat pada tabel 5.30, serta hasilnya berupa grafik dapat dilihat pada gambar 5.10 dan gambar 5.11.

Tabel 5.30 Hasil Perhitungan V/W dan T_1/N

Tingkat	V/W		T_1/N	
	Struktur K berbeda	Struktur K sama	Struktur K berbeda	Struktur K sama
6	0,38	0,44	0,14	0,11
12	0,35	0,4	0,12	0,1
18	0,3	0,38	0,062	0,06
20	0,3	0,37	0,07	0,06
25	0,3	0,37	0,05	0,05
30	0,3	0,37	0,04	0,05
35	0,3	0,37	0,04	0,04
40	0,294	0,37	0,05	0,04
45	0,3	0,37	0,04	0,04
50	0,3	0,37	0,04	0,04
60	0,3	0,38	0,05	0,04
80	0,3	0,37	0,05	0,04
100	0,3	0,37	0,048	0,04



Gambar 5.10 Grafik V/W

Gambar 5.11 Grafik T₁/N

Pada suatu penelitian disebutkan bahwa nilai frequency ratio untuk bangunan yang reguler akan menghasilkan nilai secara urut dari ω_2/ω_1 sampai ω_5/ω_1 yaitu 3,5,7, dan 9. Dibawah ini dapat dilihat selisih antara hasil penelitian tersebut dengan ProgSIP 2001.

Tabel 5.31 Selisih Frequency Ratios

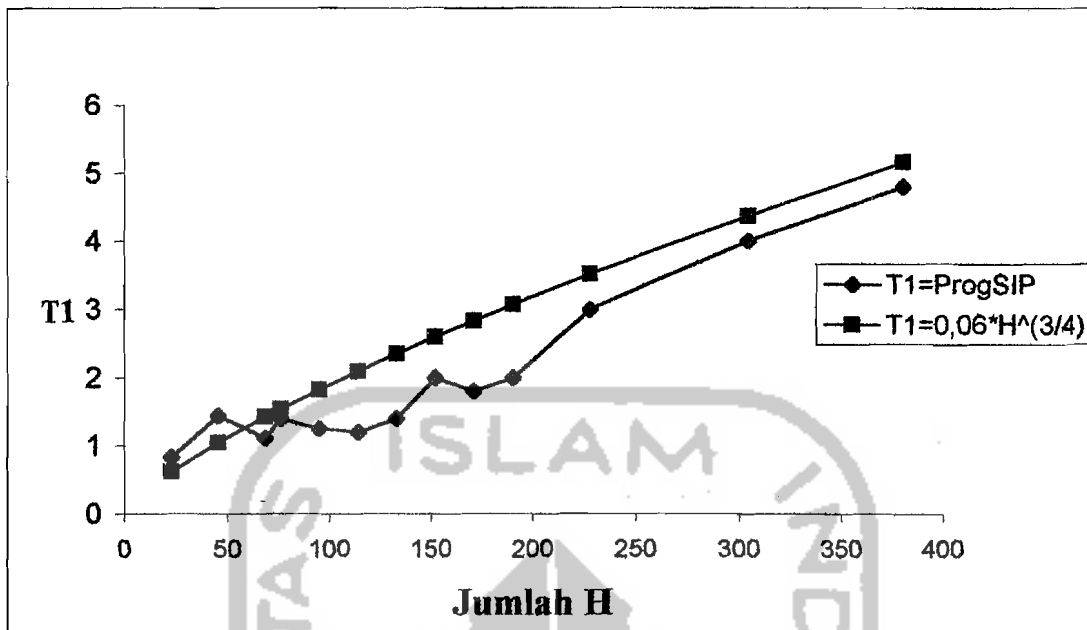
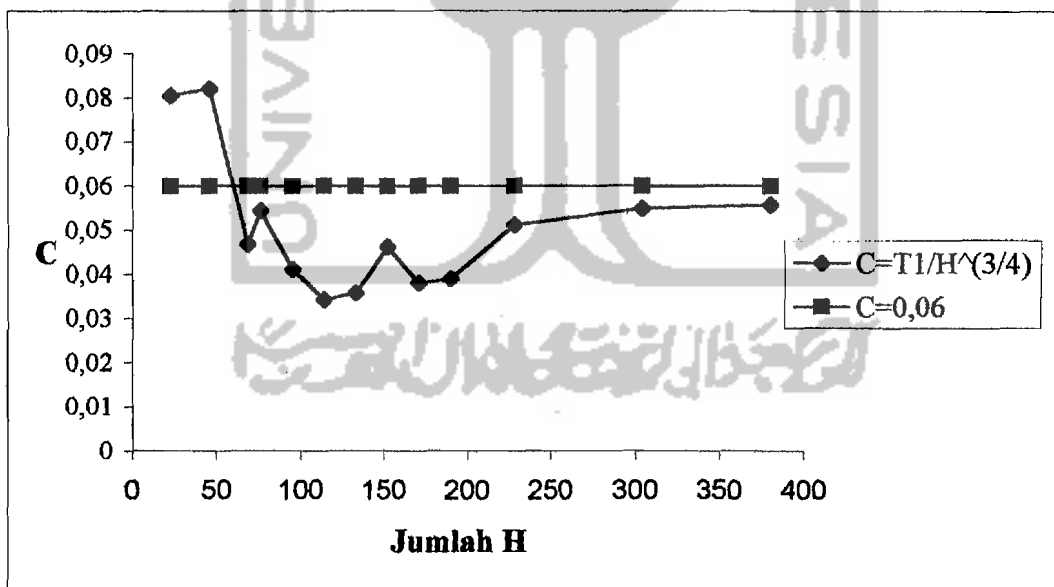
Tingkat	Selisih ω_2/ω_1	Selisih ω_3/ω_1	Selisih ω_4/ω_1	Selisih ω_5/ω_1
6	0,07	0,34	0,93	----
12	0,04	0,13	0,28	0,56
18	0,06	0,13	0,19	0,37
20	0,05	0,11	0,19	0,32
25	0,05	0,11	0,17	0,26
30	0,06	0,14	0,18	0,26
35	0,05	0,1	0,16	0,25
40	0,07	0,16	0,19	0,26
45	0,05	0,13	0,17	0,2
50	0,07	0,17	0,2	0,26
60	0,08	0,18	0,2	0,27
80	0,09	0,19	0,21	0,28
100	0,09	0,2	0,21	0,29

Selain selisih nilai frequency ratios, juga akan dibandingkan antara nilai T_1 hasil dari rumus 3.28b, yaitu $T_1 = 0,06 H^{3/4}$, dengan nilai T_1 dari hasil perhitungan ProgSIP 2001, yang dipakai adalah struktur dengan kekakuan berbeda. Hasil perbandingan T_1 tersebut dapat dilihat pada tabel 5.32, kemudian dari hasil tersebut dibuat grafik plot antara tinggi total dengan nilai T_1 . Grafiknya dapat dilihat pada gambar 5.12. Jika pada rumus 3.28b nilai 0,06 adalah koefisien yang dinamakan C, maka dari nilai T_1

pada ProgSIP 2001 dapat dihitung nilai C tersebut. Dan akan dibandingkan antara nilai C dengan rumus 3.28b dan nilai C dari hasil ProgSIP 2001. Hasilnya dapat dilihat pada tabel 5.31, dan grafiknya dapat dilihat pada gambar 5.13.

Tabel 5.32 Hasil T_1 dan Koefisien C

Tingkat	Jumlah H	$T_1=0,06 H^{3/4}$	T_1 Hasil ProgSIP 2001	$C=0,06$	$C=T_1/H^{3/4}$
6	22,8	0,62604	0,84	0,06	0,080506
12	45,6	1,05287	1,44	0,06	0,082061
18	68,4	1,427064	1,116	0,06	0,046922
20	76	1,544406	1,4	0,06	0,05439
25	95	1,825761	1,25	0,06	0,041079
30	114	2,093292	1,2	0,06	0,034396
35	133	2,349849	1,4	0,06	0,035747
40	152	2,597371	2	0,06	0,046201
45	171	2,837255	1,8	0,06	0,038065
50	190	3,070552	2	0,06	0,039081
60	228	3,520484	3	0,06	0,051129
80	304	4,368239	4	0,06	0,054942
100	380	5,164032	4,8	0,06	0,05577

Gambar 5.12 Grafik Perbandingan Nilai T₁

Gambar 5.13 Grafik Perbandingan Koefisien C

Dalam menghitung *modeshape*, untuk menguji bahwa hasil dari *modeshape* tersebut benar, dipakai rumus $[\phi_i]^T [M] [\phi_j] = 0$, syaratnya $i \neq j$. Pada program ProgSIP 2001, nilai *modeshape*-nya juga akan diuji dengan rumus di atas. Berikut contoh perhitungan pengujian hasil *modeshape* untuk struktur 3 lantai. Hasil *modeshape* dan massa struktur diambil dari data dan hasil yang dipakai pada verifikasi.

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{bmatrix}, \quad \phi = \begin{matrix} \phi_i & \phi_j \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1,42074 & 0,307411 & -1,14482 \\ 1,588626 & -0,52093 & 0,453138 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Pada perhitungan ini dipakai $\phi_i = \phi_1$ dan $\phi_j = \phi_2$.

$$[\phi_i]^T [M] [\phi_j] = \begin{bmatrix} 1 & 1,42074 & 1,588626 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0,307411 \\ -0,52093 \end{bmatrix} \\ = 0,0000015437 \approx 0$$

Berikut pengujian untuk struktur 20, 40, 60, 80, dan 100 lantai, hasilnya dapat dilihat pada tabel 5.32 di bawah ini.

Tabel 5.33 Pengujian Nilai *modeshape*

Tingkat	Mode yang dipakai	$[\phi_i]^T [M] [\phi_j]$
20	1 dan 19	0,00003
40	2 dan 34	0,258
60	5 dan 56	0,01
80	3 dan 10	0,0034
100	2 dan 14	0,028

5.10. Perhitungan *Modal Effective Height* (h_i^*)

Modal effective height dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$h_j^* = \frac{\sum_{j=1}^N h_j m_j \phi_j}{m_j \phi_j} \dots \dots \dots (5.11)$$

Berikut tabel hasil perhitungan *modal effective height* untuk 6 tingkat.

Tabel 5.34 Hasil perhitungan *Modal Effective Height* 6 tingkat

Mode	<i>Modal Effective Height</i> (h_i^*) (m)
1	12,5357
2	1,63178
3	2,38575
4	-1,41718
5	2,0947
6	-1,31954

5.11. Pembahasan

Pada penelitian ini lebih ditekankan pada pengaruh *mode* terhadap gedung-gedung bertingkat banyak. Pengaruh *mode* tersebut dapat dilihat pada hasil *modal effective mass*, pada tabel 5.27 terlihat batas-batas prosentase *modal effective mass* yang mencapai 90% dari struktur yang mempunyai 6 lantai sampai struktur yang mempunyai 100 lantai. Dari tabel 5.27 tersebut kemudian dibuat grafik yaitu pada gambar 5.7. Dari grafik tersebut diperoleh bahwa untuk struktur yang mempunyai kekakuan tingkat yang berbeda-beda, *modal effective mass* yang mencapai 90% berkisar pada *mode* yang ke-37% sampai *mode* yang ke-50%, serta grafiknya

menurun dari struktur 6 lantai sampai struktur 100 lantai, hal itu disebabkan oleh kekakuan untuk masing-masing tingkat tidak seluruhnya sama. Sedangkan untuk struktur yang mempunyai kekakuan seluruh tingkat sama, prosentasenya berkisar antara 31% sampai 35%, grafiknya berupa garis horisontal. Berbeda dengan struktur yang mempunyai kekakuan berbeda, pada struktur jenis ini dari 6 tingkat sampai 100 tingkat prosentasenya hampir sama, hal itu disebabkan oleh kekakuan masing-masing tingkat sama.



5.12. VERIFIKASI

Verifikasi untuk struktur 3 lantai antara perhitungan secara manual dan perhitungan dengan program ProgSIP 2001.

5.12.1. Data Struktur

Data struktur pada perhitungan secara manual dan perhitungan dengan program ProgSIP 2001 tidak kami hitung, tetapi sudah ditentukan. Data struktur tersebut adalah sebagai berikut :

Tabel 5.35 Data Struktur Gedung 3 Tingkat

Tingkat	Tinggi (H)	Massa (M)	Kekakuan (K)
1	4	2	100
2	4	3	200
3	5,2	4	300

5.12.2. Perhitungan Manual

Dalam perhitungan secara manual, untuk mencari nilai omega (ω) dipakai metode Secan. Setelah nilai omega didapat, maka nilai modeshape pun didapat. Kemudian setelah nilai modeshape didapat, perhitungan dilanjutkan dengan menghitung *modal effective mass*, *modal effective height*, *modal seismic force*, *modal shear force*, *modal overtuning moment*, *modal lateral displacement*, dan *modal story drift*.

Penyelesaian :

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_1 & k_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 300 & -200 & 0 \\ -200 & 500 & -300 \\ 0 & -300 & 300 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \\ 4 \\ 5,2 \end{bmatrix}, I = 1,0 ; K = 1$$

Dari matriks di atas, maka persamaan eigen problem dapat disusun sebagai berikut :

$$\left\{ \begin{bmatrix} 300 & -200 & 0 \\ -200 & 500 & -300 \\ 0 & -300 & 300 \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Persamaan matriks di atas dapat ditulis menjadi :

$$\begin{bmatrix} 300 - 2\omega^2 & -200 & 0 \\ -200 & 500 - 3\omega^2 & -300 \\ 0 & -300 & 300 - 4\omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Apabila diambil suatu notasi bahwa, $\lambda = \omega^2$

Maka persamaan matriksnya dapat ditulis menjadi :

$$\begin{bmatrix} 300 - 2\lambda & -200 & 0 \\ -200 & 500 - 3\lambda & -300 \\ 0 & -300 & 300 - 4\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Apabila persamaan di atas disederhanakan, maka akan menjadi :

$$(300 - 2\lambda)\phi_1 - 200\phi_2 = 0 \dots\dots\dots (5.12a)$$

$$-200\phi_1 + (500 - 3\lambda)\phi_2 - \phi_3 = 0 \dots\dots\dots (5.12b)$$

$$-300\phi_2 + (300 - 4\lambda)\phi_3 = 0 \dots\dots\dots (5.12c)$$

Dengan mengambil nilai,

$$\phi_1 = 1 \dots\dots\dots (5.13)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 5.13 pada persamaan 5.12a, maka didapat :

$$\phi_2 = (1,5 - 0,01\lambda) \dots\dots\dots (5.14)$$

Kemudian persamaan 5.13 dan persamaan 5.14 disubstitusi kepersamaan 5.12b, maka akan diperoleh :

$$\phi_3 = 0,0001\lambda^2 - 0,03167\lambda + 1,8333 \dots\dots\dots (5.15)$$

Selanjutnya substitusi persamaan 5.14 dan persamaan 5.15 kedalam persamaan 5.12c, setelah disusun maka akan diperoleh :

$$\lambda^3 - 1566,8\lambda^2 + 138342\lambda - 999900 = 0 \dots\dots\dots (5.16)$$

Sesuatu yang akan dicari pada persamaan (5.16) adalah nilai-nilai ϕ_i yang memenuhi persamaan tersebut. Hal ini berarti bahwa yang akan dicari adalah akar-akar dari persamaan tersebut. Dengan memperhatikan persamaan (5.16) di atas maka dapatlah diketahui bahwa pangkat terbesar dari persamaan polinomial pada persamaan (5.16) tersebut sama dengan jumlah derajat kebebasan. Oleh karena itu struktur yang mempunyai 3-derajat kebebasan atau struktur 3-tingkat akan menghasilkan persamaan polinomial pangkat 3. Dengan demikian untuk struktur yang bertingkat banyak, maka akan menghasilkan persamaan polinomial pangkat banyak pula. Hal inilah yang menjadi kelemahan pada metode polinomial.

Pada hitungan manual ini, untuk mencari akar-akar pada persamaan (5.16) dipakai metode Secant. Setelah didapat akar-akarnya, maka percepatan sudutnya akan didapat pula. Nilai akar-akar dari persamaan dan percepatan sudutnya adalah :

$$\lambda_1 = 7,9377 \quad \text{maka } \omega = \sqrt{7,9377} = 2,81739 \dots \dots \dots (5.17a)$$

$$f_1 = 0,44822 \quad T_1 = 2,23104 \text{ dt}$$

$$\lambda_2 = 119,2588 \quad \text{maka } \omega = \sqrt{119,2588} = 10,92056 \dots \dots \dots (5.17b)$$

$$f_2 = 1,73736 \quad T_2 = 0,57559 \text{ dt}$$

$$\lambda_3 = 264,4819 \quad \text{maka } \omega = \sqrt{264,4819} = 16,26289 \dots \dots \dots (5.17c)$$

$$f_3 = 2,587278 \quad T_3 = 0,38651 \text{ dt}$$

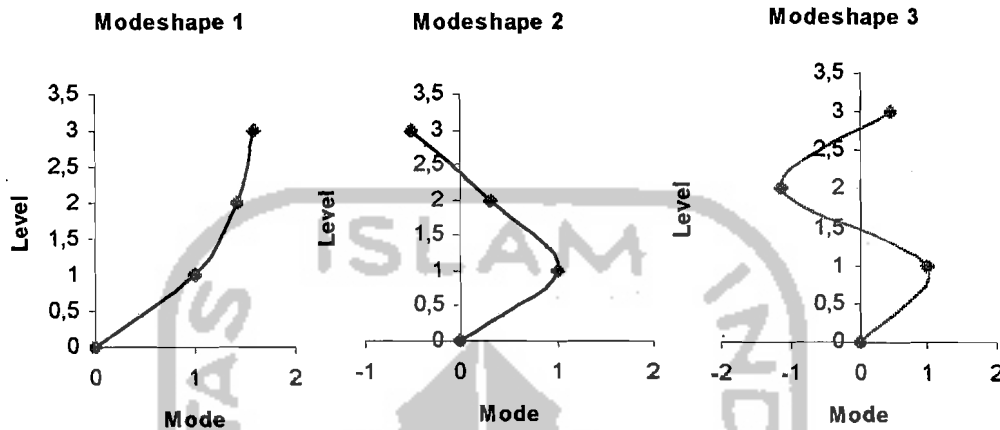
Dari nilai T_1 di atas, dengan data wilayah gempa 4, dan jenis tanahnya adalah tanah lunak, maka dapat ditentukan nilai koefisien gempa dasar (C) yaitu $C = 0,025$.

Nilai-nilai ordinat tiap pola/ragam goyangan/mode ϕ_i dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (5.13), (5.14), (5.15). Agar proses perhitungan lebih sistematis maka untuk mencari ϕ_i ditabelkan sebagai berikut :

Tabel 5.36 Hasil Modeshape (ϕ_{ij})

No	Fungsi ϕ_i	Nilai ϕ_{ij}		
		Mode ke-1 $\lambda_1 = 7,9377$	Mode ke-2 $\lambda_2 = 119,2588$	Mode ke-3 $\lambda_3 = 264,4819$
1	$\phi_1 = 1$	1	1	1
2	$\phi_2 = (1,5 - 0,01 \lambda)$	1,42062	0,3074	-1,144819
3	$\phi_3 = 0,0001 \lambda^2 - 0,03167 \lambda + 1,8333$	1,5882	-0,5214	0,4522

Selanjutnya nilai-nilai ordinat *normal modes* ϕ_{ij} digambar seperti gambar dibawah ini :



Gambar 5.14 Grafik *Modeshape* Struktur 3 tingkat

Setelah modeshape didapat, kemudian dilanjutkan dengan *modal effective mass* dan perhitungan-perhitungan yang lainnya.

5.12.2. Modal Effective Mass

Modal effective mass dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$M_m = \frac{\left[\sum_{i=1}^N \phi_{im} M_i \right]^2}{\sum_{i=1}^N \phi_{im}^2 M_i} \quad \dots \dots \dots (5.18)$$

Dari data struktur dan hasil modeshape di atas, dengan menggunakan rumus M_m pada persamaan (5.17), maka *modal effective mass* dapat dicari :

➤ Mode 1 :

$$M_1 = \frac{\begin{bmatrix} (1,00 & 1,42062 & 1,5882) \\ \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix} \end{bmatrix}^2}{\begin{bmatrix} (1,00^2 & 1,42062^2 & 1,5882^2) \\ \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix} \end{bmatrix}} = 8,77037 \text{ kg} \frac{dt^2}{cm}$$

➤ Mode 2 :

$$M_2 = \frac{\begin{bmatrix} (1,00 & 0,3074 & -0,5214) \\ \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix} \end{bmatrix}^2}{\begin{bmatrix} (1,00^2 & 0,3074^2 & -0,5214^2) \\ \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix} \end{bmatrix}} = 0,20763 \text{ kg} \frac{dt^2}{cm}$$

➤ Mode 3 :

$$M_3 = \frac{\begin{bmatrix} (1,00 & -1,144819 & 0,4522) \\ \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix} \end{bmatrix}^2}{\begin{bmatrix} (1,00^2 & -1,144819^2 & 0,4522^2) \\ \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix} \end{bmatrix}} = 0,02076 \text{ kg} \frac{dt^2}{cm}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{total}} &= M_1 + M_2 + M_3 \\ &= 8,77037 + 0,20763 + 0,02076 \\ &= 8,99876 \text{ kg} \frac{dt^2}{cm} \end{aligned}$$

Prosentase modal effective mass pada masing-masing mode :

➤ Mode 1 :

$$\% M_1 = \frac{8,77037}{8,99876} \times 100\% = 97,45 \%$$

➤ Mode 2 :

$$\% M_2 = \frac{0,20763}{8,99876} \times 100\% = 2,31 \%$$

➤ Mode 3 :

$$\% M_3 = \frac{0,02076}{8,99876} \times 100\% = 0,23 \%$$

5.12.3. Modal Base Shear (V_m)

Modal base shear dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

Sebelum menghitung V_m , dihitung dahulu besarnya gaya geser dasar dengan metode beban statik ekuivalen V . Rumus untuk menghitung V adalah $V = C I K W_t$. Setelah V didapat, kemudian V dikalikan dengan prosentase masing-masing mode dari M_m dan didapatlah nilai V_m untuk masing-masing mode.

$$\begin{aligned} V &= C * I * K * W_t \\ &= 0,025 * 1,0 * 1,0 * (9 * 0,981) \\ &= 0,220725 \text{ ton} \end{aligned}$$

➤ Mode 1 :

$$V_1 = 97,45 \% \times 0,220725 = 0,215097 \text{ ton}$$

➤ Mode 2 :

$$V_2 = 2,31 \% \times 0,220725 = 0,005099 \text{ ton}$$

➤ Mode 3 :

$$V_3 = 0,23 \% \times 0,220725 = 0,0005077 \text{ ton}$$

Untuk lebih lengkapnya nilai *modal effective mass* dan *modal base shear* dapat dilihat pada tabel 5.34 dibawah ini :

Tabel 5.37 Modal Effective Mass (M_m) dan Modal Base Shear (V_m)

Mode (m)	Modal Effective Mass			Modal Base Shear V_m (ton)
	M_m (kg)	%	% Kumulatif	
1	8,77037	97,45	97,45	0,215097
2	0,20763	2,31	99,76	0,005099
3	0,02076	0,23	99,99	0,0005077

$$\Sigma = 8,99876$$

5.12.4. Modal Effective Height (h_j^*)

Modal effective height dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$h_j^* = \frac{\sum_{j=1}^N h_j m_j \phi_j}{m_j \phi_j} \dots \dots \dots (5.19)$$

Perhitungan modal effective height dapat dilihat di bawah ini :

➤ Mode 1 :

$$h_1^* = \frac{(h_1 x m_1 x \phi_{11}) + (h_2 x m_2 x \phi_{21}) + (h_3 x m_3 x \phi_{31})}{(m_1 x \phi_{11}) + (m_2 x \phi_{21}) + (m_3 x \phi_{31})}$$

$$h_1^* = \frac{(4x2x1,0) + (8x3x1,42062) + (13,2x4x1,5882)}{(2x1,0) + (3x1,42062) + (4x1,5882)}$$

$$h_1^* = 9,9846 \text{ m}$$

➤ Mode 2 :

$$h_2^* = \frac{(h_1 x m_1 x \phi_{12}) + (h_2 x m_2 x \phi_{22}) + (h_3 x m_3 x \phi_{32})}{(m_1 x \phi_{12}) + (m_2 x \phi_{22}) + (m_3 x \phi_{32})}$$

$$h_2 = \frac{(4 \times 2 \times 1,0) + (8 \times 3 \times 0,3074) + (13,2 \times 4 \times (-0,5214))}{(2 \times 1,0) + (3 \times 0,3074) + (4 \times (-0,5214))}$$

$$h_2^* = -14,5258 \text{ m}$$

➤ Mode 3 :

$$h_3^* = \frac{(h_1 \times m_1 \times \phi_{13}) + (h_2 \times m_2 \times \phi_{23}) + (h_3 \times m_3 \times \phi_{33})}{(m_1 \times \phi_{13}) + (m_2 \times \phi_{23}) + (m_3 \times \phi_{33})}$$

$$h_3^* = \frac{(4 \times 2 \times 1,0) + (8 \times 3 \times (-1,144819)) + (13,2 \times 4 \times 0,4522)}{(2 \times 1,0) + (3 \times (-1,144819)) + (4 \times 0,4522)}$$

$$h_1^* = 11,75527 \text{ m}$$

Tabel 5.38 Modal Effective Height

Mode	Modal Effective Height (h_i^* (m))
1	9,9846
2	-14,5258
3	11,75527
	$\Sigma = 7,21407$

5.12.5. Modal Seismic Force (F_{im})

$$F_{im} = C_{im} \times V_m \dots \dots \dots (5.20)$$

$$C_{im} = \frac{\phi_{im} W_i}{\sum_{j=1}^N \phi_{jm} W_j} \dots \dots \dots (5.21)$$

➤ Mencari C_{im} :

➤ Mode 1 :

$$\sum_{j=1}^N \phi_{j1} m_j = (1,00 \quad 1,42062 \quad 1,5882) \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix} = 12,61466$$

$$C_{11} = \frac{(1,00 \times 2)}{12,61466} = 0,1585$$

$$C_{21} = \frac{(1,42062 \times 3)}{12,61466} = 0,3378$$

$$C_{31} = \frac{(1,5882 \times 4)}{12,61466} = 0,5036$$

➤ Mode 2 :

$$\sum_{j=1}^N \phi_{j2} m_j = (1,00 \quad 0,3074 \quad -0,5214) \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix} = 0,8366$$

$$C_{12} = \frac{(1,00 \times 2)}{0,8366} = 2,3906$$

$$C_{22} = \frac{(0,3074 \times 3)}{0,8366} = 1,1023$$

$$C_{32} = \frac{(-0,5214 \times 4)}{0,8366} = -2,4929$$

➤ Mode 3 :

$$\sum_{j=1}^N \phi_{j3} m_j = (1,00 \quad -1,144819 \quad 0,4522) \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix} = 0,3743$$

$$C_{13} = \frac{(1,00 \times 2)}{0,3743} = 5,3433$$

$$C_{23} = \frac{(-1,144819 \times 3)}{0,3743} = -9,1757$$

$$C_{33} = \frac{(0,4522 \times 4)}{0,3743} = 4,8325$$

➤ Mencari F_{im} :

$$F_{im} = C_{im} \times V_m$$

➤ Mode 1 :

$$F_{11} = 0,1585 \times 0,215097 = 0,03409$$

$$F_{21} = 0,3378 \times 0,215097 = 0,07266$$

$$F_{31} = 0,5036 \times 0,215097 = 0,10832$$

➤ Mode 2 :

$$F_{12} = 2,3906 \times 0,005099 = 0,012189$$

$$F_{22} = 1,1023 \times 0,005099 = 0,005621$$

$$F_{32} = -2,4929 \times 0,005099 = -0,012711$$

➤ Mode 3 :

$$F_{13} = 5,3433 \times 0,0005077 = 0,002713$$

$$F_{23} = -9,1757 \times 0,0005077 = -0,004659$$

$$F_{33} = 4,8325 \times 0,0005077 = 0,002454$$

➤ SRSS :

$$F_1 = \sqrt{F_{11}^2 + F_{12}^2 + F_{13}^2} = \sqrt{0,03409^2 + 0,012189^2 + 0,002713^2} = 0,036305$$

$$F_2 = \sqrt{F_{21}^2 + F_{22}^2 + F_{23}^2} = \sqrt{0,07266^2 + 0,005621^2 + (-0,004659)^2} = 0,073026$$

$$F_3 = \sqrt{F_{31}^2 + F_{32}^2 + F_{33}^2} = \sqrt{0,10832^2 + (-0,012711)^2 + 0,002454^2} = 0,109091$$

Untuk lebih memudahkan dalam melihat nilai-nilai *modal seismic coefficient* dan *modal seismic force*, maka nilai-nilai tersebut dimasukkan kedalam tabel 5.36 dan tabel 5.37 berikut :

Tabel 5.39 Modal Seismic Coefficient (C_{im})

Level	Mode 1	Mode 2	Mode 3
3	0,5036	-2,4929	4,8325
2	0,3378	1,1023	-9,1757
1	0,1585	2,3906	5,3433

Tabel 5.40 Modal Seismic Force (F_{im})

Level	Mode 1	Mode 2	Mode 3	F_i (ton)
3	0,10832	-0,012711	0,002454	0,109091
2	0,07266	0,005621	-0,004659	0,073026
1	0,03409	0,012189	0,002713	0,036305

5.12.6. Modal Shear Force (V_{im})

Modal shear force pada suatu tingkat merupakan jumlah gaya gempa F_{im} diatas tingkat tersebut. Persamaan matematisnya seperti rumus dibawah ini :

$$V_{im} = \sum_{j=1}^N F_{jm} \dots\dots\dots (5.22)$$

Hasilnya dapat dilihat pada tabel 5.41 berikut ini :

Tabel 5.41 Modal ShearForce (V_{im})

Level	Mode 1	Mode 2	Mode 3	V_j (ton)
3	0,10832	-0,012711	0,002454	0,109091
2	0,18098	-0,007095	-0,002215	0,181135
1	0,21508	0,005095	0,00051	0,215135

5.12.7. Modal Overtuning Moment

Modal overtuning moment dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$M_{im} = \sum_{j=i+1}^N F_{jm} (h_j - h_i) \dots\dots\dots (5.23)$$

➤ Mode 1 :

$$M_{31} = 0$$

$$\begin{aligned} M_{21} &= (F_{31} \times (h_3 - h_2)) \\ &= 0,10832 \times (13,2 - 8) \\ &= 0,563264 \text{ tm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{11} &= (F_{31} \times (h_3 - h_1)) + (F_{21} \times (h_2 - h_1)) \\ &= (0,10832 \times (13,2 - 4)) + (0,07266 \times (8 - 4)) \\ &= 1,287185 \text{ tm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Base} &= (F_{31} \times (h_3 - h_0)) + (F_{21} \times (h_2 - h_0)) + (F_{11} \times (h_1 - h_0)) \\
 &= (0,10832 \times (13,2 - 0)) + (0,07266 \times (8 - 0)) + (0,03409 \times (4 - 0)) \\
 &= 2,14748 \text{ tm}
 \end{aligned}$$

➤ Mode 2 :

$$\begin{aligned}
 M_{32} &= 0 \\
 M_{22} &= (F_{32} \times (h_3 - h_2)) \\
 &= (-0,012711 \times (13,2 - 8)) \\
 &= -0,06612 \text{ tm} \\
 M_{12} &= (F_{32} \times (h_3 - h_1)) + (F_{22} \times (h_2 - h_1)) \\
 &= (-0,012711 \times (13,2 - 4)) + (0,005621 \times (8 - 4)) \\
 &= -0,094495 \text{ tm} \\
 \text{Base} &= (F_{31} \times (h_3 - h_0)) + (F_{21} \times (h_2 - h_0)) + (F_{11} \times (h_1 - h_0)) \\
 &= (-0,012711 \times (13,2 - 0)) + (0,005621 \times (8 - 0)) + (0,012189 \times (4 - 0)) \\
 &= -0,07412 \text{ tm}
 \end{aligned}$$

➤ Mode 3 :

$$\begin{aligned}
 M_{33} &= 0 \\
 M_{23} &= (F_{33} \times (h_3 - h_2)) \\
 &= (0,002454 \times (13,2 - 8)) \\
 &= 0,01282 \text{ tm} \\
 M_{13} &= (F_{33} \times (h_3 - h_1)) + (F_{23} \times (h_2 - h_1)) \\
 &= (0,002454 \times (13,2 - 4)) + (-0,004659 \times (8 - 4)) \\
 &= 0,00396 \text{ tm} \\
 \text{Base} &= (F_{33} \times (h_3 - h_0)) + (F_{23} \times (h_2 - h_0)) + (F_{13} \times (h_1 - h_0)) \\
 &= (0,002454 \times (13,2 - 0)) + (-0,004659 \times (8 - 0)) + (0,002713 \times (4 - 0)) \\
 &= 0,005995 \text{ tm}
 \end{aligned}$$

➤ SRSS :

$$\begin{aligned}
 M_3 &= 0 \\
 M_2 &= \sqrt{M_{21}^2 + M_{22}^2 + M_{23}^2} = \sqrt{0,563264^2 + (-0,06612)^2 + 0,01282^2} = 0,56728 \\
 &\text{tm}
 \end{aligned}$$

$$M_1 = \sqrt{M_{11}^2 + M_{12}^2 + M_{13}^2} = \sqrt{1,287185^2 + (-0,094495)^2 + 0,00396^2} = 1,29065$$

tm

$$\text{Base} = \sqrt{M_{b1}^2 + M_{b2}^2 + M_{b3}^2} = \sqrt{2,14748^2 + (-0,07412)^2 + 0,005995^2} = 2,14876$$

tm

Tabel 5.42 Modal Overtuning Moment (M_{im})

Level	Mode 1	Mode 2	Mode 3	M_i (tm)
3	0	0	0	0
2	0,563264	-0,06612	0,01282	0,56728
1	1,287185	-0,094495	0,00396	1,29065
Base	2,14748	-0,07412	0,005995	2,14876

5.12.8. Modal Story Drift (Δ_{im})

Modal story drift dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\Delta_{im} = \frac{V_{im}}{0,9Kk_i} \dots \dots \dots (5.24)$$

Dimana :

V_{im} adalah modal shear force

K adalah faktor jenis struktur = 1

k_i adalah kekakuan struktur

Dari rumus dan data-data di atas, maka didapat :

➤ Mode 1 :

$$\begin{aligned} \Delta_{31} &= \left(\frac{V_{31}}{(0,9 \times K \times k_3)} \right) \\ &= \left(\frac{0,10832}{(0,9 \times 1,0 \times 300)} \right) \\ &= 0,0004012 \text{ m} = 0,4012 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta_{21} &= \left(\frac{V_{21}}{(0,9xKxk_2)} \right) \\ &= \left(\frac{0,18098}{(0,9x1,0x200)} \right) \\ &= 0,00100545 \text{ m} = 1,00545 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta_{11} &= \left(\frac{V_{11}}{(0,9xKxk_1)} \right) \\ &= \left(\frac{0,21508}{(0,9x1,0x100)} \right) \\ &= 0,0023897 \text{ m} = 2,3897 \text{ mm}\end{aligned}$$

➤ Mode 2 :

$$\begin{aligned}\Delta_{32} &= \left(\frac{V_{32}}{(0,9xKxk_3)} \right) \\ &= \left(\frac{-0,012711}{(0,9x1,0x300)} \right) \\ &= -0,000047095 \text{ m} = -0,0471 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta_{22} &= \left(\frac{V_{22}}{(0,9xKxk_2)} \right) \\ &= \left(\frac{-0,007095}{(0,9x1,0x200)} \right) \\ &= -0,0000394 \text{ m} = -0,0394 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta_{12} &= \left(\frac{V_{12}}{(0,9xKxk_1)} \right) \\ &= \left(\frac{0,005095}{(0,9x1,0x100)} \right) \\ &= 0,0000566 \text{ m} = 0,0566 \text{ mm}\end{aligned}$$

➤ Mode 3 :

$$\begin{aligned}\Delta_{33} &= \left(\frac{V_{33}}{(0,9 \times Kxk_3)} \right) \\ &= \left(\frac{0,002454}{(0,9 \times 1,0 \times 300)} \right) \\ &= 0,00000913 \text{ m} = 0,00913 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta_{23} &= \left(\frac{V_{23}}{(0,9 \times Kxk_2)} \right) \\ &= \left(\frac{-0,002215}{(0,9 \times 1,0 \times 200)} \right) \\ &= -0,00001203 \text{ m} = -0,01203 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta_{13} &= \left(\frac{V_{13}}{(0,9 \times Kxk_1)} \right) \\ &= \left(\frac{0,00051}{(0,9 \times 1,0 \times 100)} \right) \\ &= 0,00000567 \text{ m} = 0,00567 \text{ mm}\end{aligned}$$

➤ SRSS :

$$\Delta_3 = \sqrt{\Delta_{31}^2 + \Delta_{32}^2 + \Delta_{33}^2} = \sqrt{0,4012^2 + (-0,0471)^2 + 0,00913^2} = 0,4041 \text{ mm}$$

$$\Delta_2 = \sqrt{\Delta_{21}^2 + \Delta_{22}^2 + \Delta_{23}^2} = \sqrt{1,00545^2 + (-0,0394)^2 + (-0,01203)^2} = 1,0063 \text{ mm}$$

$$\Delta_1 = \sqrt{\Delta_{11}^2 + \Delta_{12}^2 + \Delta_{13}^2} = \sqrt{2,3897^2 + 0,0566^2 + 0,00567^2} = 2,3904 \text{ mm}$$

Tabel 5.43 Modal Story Drift (Δ_{im})

Level	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Δ_i (mm)
3	0,4012	-0,0471	0,00913	0,4041
2	1,00545	-0,0394	-0,01203	1,0063
1	2,3897	0,0566	0,00567	2,3904

5.12.9. Modal Lateral Displacement (d_{im})

Modal lateral displacement pada tingkat gedung kc-i dihitung dengan :

$$d_{im} = \sum_{j=1}^i \Delta_{jm} \dots \dots \dots (5.25)$$

Modal lateral displacement merupakan jumlah dari modal story drift yang berada di bawahnya. Hasilnya dapat dilihat sebagai berikut :

Tabel 5.44 Modal Lateral Displacement (d_{im})

Level	Mode 1	Mode 2	Mode 3	d_i (mm)
3	3,7964	-0,0299	0,00277	3,7965
2	3,3952	0,0172	-0,00636	3,3954
1	2,3897	0,0566	0,00567	2,3904

5.13. Perbandingan Hasil ProgSIP 2001 dengan Hasil Manual

Pada perbandingan kedua hasil ini dipakai hasil 3 tingkat.

5.13.1. Modeshape

Tabel 5.45 Modeshape

Level	Modeshape					
	Manual			ProgSIP 2001		
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 1	Mode 2	Mode 3
3	1,5882	-0,5214	0,4522	1,588626	-0,52093	0,453138
2	1,42062	0,3074	-1,144819	1,42074	0,307411	-1,14482
1	1,0	1,0	1,0	1	1	1

5.13.2. Modal Effective Mass (M_{im})

Tabel 5.46 Modal Effective Mass (M_{im})

Mode	Modal Effective Mass (M_{im})	
	Manual	ProgSIP 2001
1	8,77037	8,770132
2	0,20763	0,208699
3	0,02076	0,021169

5.13.3. Modal Effective Height (h_j^*)

Tabel 5.47 Modal Effective Height (h_j^*)

Mode	Modal Effective Height (h_j^*)	
	Manual	ProgSIP 2001
1	9,9846	9,98494
2	-14,5258	-14,4628
3	11,75527	11,76956

5.13.4. Modal Seismic Force (F_{im})

Tabel 5.48 Modal Seismic Force (F_{im})

Level	Modal Seismic Force (F_{im})					
	Manual			ProgSIP 2001		
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 1	Mode 2	Mode 3
3	0,10832	-0,01271	0,002454	0,108330	-0,01272	0,002489
2	0,07266	0,005621	-0,004659	0,072662	0,005629	-0,00472
1	0,03409	0,012189	0,002713	0,034096	0,012208	0,002746

5.13.5. Modal Shear Force (V_{im})

Tabel 5.49 Modal Shear Force (V_{im})

Level	Modal Shear Force (V_{im})					
	Manual			ProgSIP 2001		
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 1	Mode 2	Mode 3
3	0,10832	-0,01271	0,002454	0,108330	-0,01272	0,002489
2	0,18098	-0,00709	-0,002215	0,180992	-0,00709	-0,00223
1	0,21508	0,005095	0,00051	0,215087	0,005118	0,000519

5.13.6. Modal Overtuning Moment (M_{im})

Tabel 5.50 Modal Overtuning Moment (M_{im})

Level	Modal Overtuning Moment (M_{im})					
	Manual			ProgSIP 2001		
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 1	Mode 2	Mode 3
3	0	0	0	0	0	0
2	0,563264	-0,0661	0,01282	0,563318	-0,06614	0,012942
1	1,287185	-0,0945	0,00396	1,287285	-0,0945	0,004034
Base	2,14748	-0,0741	-0,07412	2,147635	-0,07403	0,00611

5.13.7. Modal Story Drift (Δ_{im})

Tabel 5.51 Modal Story Drift (Δ_{im})

Level	Modal Story Drift (Δ_{im})					
	Manual			ProgSIP 2001		
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 1	Mode 2	Mode 3
3	0,4012	-0,0471	0,00913	0,401224	-0,04711	0,009218
2	1,00545	-0,0394	-0,01203	1,00551	-0,03939	-0,01237
1	2,3897	0,0566	0,00567	2,389861	0,056871	0,005769

5.13.8. Modal Lateral Displacement (d_{im})

Tabel 5.52 Modal Lateral Displacement (d_{im})

Level	Modal Lateral Displacement (d_{im})					
	Manual			ProgSIP 2001		
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 1	Mode 2	Mode 3
3	3,7964	-0,0299	0,00277	3,796595	-0,02963	0,002614
2	3,3952	0,0172	-0,00636	3,395371	0,017483	-0,0066
1	2,3897	0,0566	0,00567	2,389861	0,056871	0,005769