3. PROSEDUR PERENCANAAN

3.1. Pendahuluan

Bab ini akan membahas perencanaan *Pseudo* Elastis, mulai dari perencanaan balok hingga kolom. Kemudian dijabarkan tata cara penginputan *Hinge Properties* pada balok dan kolom. Pada bagian akhir ditujukan prosedur Analisis Statik *Non Linear Pushover* dengan ETABS dan analisis dinamis *Time History* Non-Linier dengan RUAUMOKO 3D.

3.2. Informasi Perencanaan

Dalam penelitian ini bangunan yang digunakan adalah bangunan 6- dan 10-lantai, 4- dan 6-bentang pada arah X dan Y. Struktur bangunan tersebut berada di wlayah 2 peta gempa Indonesia menurut Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Gedung SNI 03-1726-2002.

3.3. Perencanaan *Pseudo* Elastis, *Capacity Design*, dan Perhitungan Faktor Pengali

3.3.1. Perhitungan Statik Ekuivalen

3.3.1.1.Perhitungan Periode Struktur

Sebagai analisis pendahuluan, periode elastis struktur gedung (T) dapat didapatkan dengan program ETABS *Non Linear Version* 9.0.7 dan hasilnya dilihat pada Tabel 3.1.

| Nama Bangunan | T _{elastis} (detik) |
|---------------|------------------------------|
| 6-4 | 1.0522 |
| 10-4 | 1.6792 |
| 6-6 | 1.1548 |
| 10-6 | 1.7554 |

Tabel 3.1. Faktor Pengali

3.3.1.2.Perhitungan Distribusi Gaya Geser Dasar Horisontal

Gaya geser dasar horisontal total akibat beban gempa menurut konsep SNI 03-1726-2002 dirumuskan sebagai berikut:

$$V = C.I.W_t / R \tag{3.1}$$

di mana:

- V = gaya geser total akibat gempa nominal
- C = koefisien gempa nominal
- I = faktor keutamaan
- W_t = berat bangunan
- R = faktor reduksi gempa dari struktur yang bersangkutan

Berat bangunan total yang digunakan diperoleh dari hasil perhitungan sebagai berikut:

• Untuk bangunan 6-lantai dan 4-bentang:

Beban atap:

- Beban hidup
$$(W_L)$$
:

 $q = 400 \text{ kg/m}^2$

 $W_L = (32x32x400) \times 0.3 = 122880 \text{ kg}$

- Beban mati (W_D) :
 - \circ Pelat = 2400 x 0.12 x 32 x 32 = 294912 kg
 - \circ Balok 35/70 = 2400 x (0.35 x 0.7) x 40 x 8 = 188160 kg
 - Balok anak $25/55 = 2400 \times (0.25 \times 0.55) \times 32 \times 8 = 84480 \text{ kg}$
 - Berat kolom $50/50 = 25 \times 0.5^2 \times 3.5 \times 2400 = 52500 \text{ kg}$
 - Berat dinding = $250 \times 3.5 \times (32 \times 4)$ = 112000 kg

 $W_D = 736052 \text{ kg}$

 $\rightarrow W_{total} = 858932 \text{ kg}$

Lantai:

- Beban hidup (W_L) : q = 200 kg/m²

 $W_L = (32 x 32 x 200) x 0.3 = 61440 \text{ kg}$

– Beban mati (W_D):

| 0 | Balok 35/70 = 2400 x (0.35 x 0.70) x 40 |) x 8 | = | 188160 kg | 5 |
|---|---|---------|-----|-----------|---|
| 0 | Balok 25/55 = 2400 x (0.25x0.55) x 32 x | x 8 | = | 84480 kg | 5 |
| 0 | Kolom $55/55 = 25 \ge 0.55^2 \ge 3.5 \ge 2400$ | | = | 63525 kg | 5 |
| 0 | Dinding = $250 \times 3.5 \times (32 \times 4)$ | | = 1 | 112000 kg | 5 |
| | | W_{D} | =' | 743077 kg | 5 |
| | | | | | |

 \rightarrow W_{total} = 804517 kg (1 lt), 5lt = 4022585 kg

Berat total bangunan (W_T) = 4881517 kg

• Untuk bangunan10-lantai dan 4-bentang:

Beban atap

- Beban hidup (W_L):

 $q = 400 \text{ kg/m}^2$

 $W_L = (32x32x400) \times 0.3 = 122880 \text{ kg}$

– Beban mati (W_D):

$\circ Pelat = 2400 \times 0.12 \times 32 \times 32 = 294912 \text{ kg}$

- \circ Balok 35/70 = 2400 x (0.35 x 0.7) x 40 x 8 = 188160 kg
- o Balok anak $25/55 = 2400 \text{ x} (0.25 \times 0.55) \text{ x} 32 \text{ x} 8 = 84480 \text{ kg}$
- Berat kolom $50/50 = 25 \times 0.5^2 \times 3.5 \times 2400 = 52500 \text{ kg}$
- Berat dinding = 250 x 3.5 x (32 x4) = 112000 kg W_D = 736052 kg

 $\rightarrow W_{total} = 858932 \text{ kg}$

Lantai

- Beban hidup (W_L) : q = 200 kg/m²

 $W_L = (32 \times 32 \times 200) \times 0.3 = 61440 \text{ kg}$

- Beban mati (W_D):
 - Pelat = 2400 x 0.12 x 32 x 32 = 294912 kg
 Balok 35/70 = 2400 x (0.35 x 0.70) x 40 x 8 = 188160 kg
 Balok 25/55 = 2400 x (0.25x0.55) x 32 x 8 = 84480 kg
 Kolom 60/60 = 25 x 0.60² x 3.5 x 2400 = 75600 kg
 - Dinding = $250 \times 3.5 \times (32 \times 4)$ = 112000 kg
 - $W_D = 755152 \text{ kg}$

 $\rightarrow W_{total} = 816592 \text{ kg} (1 \text{ lt}), 9 \text{lt} = 7349328 \text{ kg}$

Berat total bangunan (W_T) = 8208260 kg

• Untuk bangunan 6-lantai dan 6-bentang:

Beban atap

- Beban hidup (W_L): q = 400 kg/m²

 $W_L = (48x48x400) \times 0.3 = 276480 \text{ kg}$

- Beban mati (W_D):
 - $\circ \quad \text{Pelat} = 2400 \text{ x } 0.12 \text{ x } 48 \text{ x } 48 \qquad \qquad = 663552 \text{ kg}$
 - $\circ \quad \text{Balok } 35/70 = 2400 \text{ x } (0.35 \text{ x } 0.7) \text{ x } 84 \text{ x } 8 \qquad = 395136 \text{ kg}$
 - o Balok anak 25/55 = 2400 x (0.25 x 0.55) x 72 x 8 = 190080 kg
 - $\circ \quad \text{Berat kolom } 45/45 = 49 \text{ x } 0.45^2 \text{ x } 3.5 \text{ x } 2400 \qquad = 83349 \text{ kg}$
 - Berat dinding = $250 \times 3.5 \times (48 \times 4)$ = 168000 kg

$$W_D = 736052 \text{ kg}$$

 $\rightarrow W_{total} = 1776597 \text{ kg}$

Lantai

- Beban hidup (W_L) : q = 200 kg/m²

 $W_L = (48 \times 48 \times 200) \times 0.3 = 138240 \text{ kg}$

- Beban mati (W_D):
 - $\circ Pelat = 2400 \text{ x } 0.12 \text{ x } 48 \text{ x } 48 = 663552 \text{ kg}$
 - $\circ \quad \text{Balok } 35/70 = 2400 \text{ x } (0.35 \text{ x } 0.70) \text{ x } 84 \text{ x } 8 \qquad = 395136 \text{ kg}$
 - $\circ \quad \text{Balok } 25/55 = 2400 \text{ x } (0.25 \text{ x} 0.55) \text{ x } 72 \text{ x } 8 \qquad = 190080 \text{ kg}$
 - $\circ \quad \text{Kolom } 50/50 = 49 \text{ x } 0.50^2 \text{ x } 3.5 \text{ x } 2400 \qquad \qquad = 102900 \text{ kg}$
 - Dinding = $250 \times 3.5 \times (48 \times 4)$ = 168000 kg
 - $W_D = 1519668 \text{ kg}$

 $\rightarrow W_{total} = 1657908 \text{ kg} (1 \text{ lt}), 9 \text{ lt} = 8289540 \text{ kg}$

Berat total bangunan (W_T) = 10066137 kg

• Untuk bangunan10-lantai dan 6-bentang:

Beban atap

- Beban hidup (W_L): q = 400 kg/m²

 $W_L = (48x48x400) \times 0.3 = 276480 \text{ kg}$

- Beban mati (W_D):
 - $\circ Pelat = 2400 \times 0.12 \times 48 \times 48 = 663552 \text{ kg}$
 - \circ Balok 35/70 = 2400 x (0.35 x 0.7) x 84 x 8 = 395136 kg
 - Balok anak 25/55 = 2400 x (0.25x0.55) x 72 x 8 = 190080 kg
 - Berat kolom $45/45 = 49 \times 0.45^2 \times 3.5 \times 2400 = 83349 \text{ kg}$
 - Berat dinding = $250 \times 3.5 \times (48 \times 4)$ = 168000 kg

 $W_D = 736052 \text{ kg}$

 $\rightarrow W_{total} = 1776597 \text{ kg}$

Lantai

- Beban hidup (W_L) : $q = 200 \text{ kg/m}^2$ W_L = (48 x 48 x 200) x 0.3 = 138240 kg
- Beban mati (W_D):

 $\rightarrow W_{total} = 1679517 \text{ kg} (1 \text{ lt}), 9 \text{lt} = 15115653 \text{ kg}$

Berat total bangunan (W_T) = 16892250 kg

Gaya geser dasar horizontal akibat gempa (V) (Tabel 3.2.) harus dibagikan ke sepanjang tinggi gedung menjadi beban-beban horizontal terpusat yang bekerja pada masing-masing tingkat menurut SNI 03-1726-2002:

| | Jenis Ba | | angunan | |
|--------|----------|----------|-----------|----------|
| Lantai | 6-lantai | | 10-lantai | |
| Duntui | 4- | 6- | 4- | 6- |
| | bentang | bentang | bentang | bentang |
| 10 | - | - | 56587.38 | 107961.9 |
| 9 | - | - | 47364.93 | 90674.35 |
| 8 | - | - | 42102.16 | 81649.95 |
| 7 | - | - | 36839.39 | 71443.7 |
| 6 | 82600.36 | 153841.8 | 31576.62 | 61237.46 |
| 5 | 64017.02 | 119636.7 | 26313.85 | 51031.22 |
| 4 | 51213.62 | 95709.4 | 21051.08 | 40824.97 |
| 3 | 38410.21 | 71782.04 | 15788.31 | 30618.73 |
| 2 | 25606.81 | 47854.7 | 10525.54 | 20412.49 |
| 1 | 12803.4 | 23927.35 | 5262.77 | 10206.24 |

Tabel 3.2. Pembagian Gaya Inersia Gempa Nominal, F_i(kg)

3.3.2. Perhitungan Faktor Pengali

Faktor pengali dapat diperoleh dari Persamaan 3.2 sebagai berikut:

$$FP = \frac{\frac{C^{T}}{C^{500th}} \times \mu - f_{1} \times n_{int} \times R_{int}}{n_{eks} \times R_{eks}}$$
(3.2)

Nilai T_{plastis} didapatkan daripersamaan garis regresi yang telah didapatkan,

yaitu:

$$T_{\text{plastis}} = 2.967 * T_{\text{elastis}} + 0.313$$
 (3.3)

Sebagai contoh perhitungan faktor pengali, berikut ini adalah contoh perhitungan bangunan 6-lantai 4-bentang:

 $T_{plastis} = 2.967 \, \ast \, 1.0522 + 0.313 = 3.4348774 \; detik$

Nilai C^{T} dan C^{500th} diperoleh dari respons spektrum di wilayah 2 peta gempa Indonesia (SNI 03-1726-2002) sebagai berikut:

| C^{T} | $= 0.5$ / $T_{plastis}$ | = 0.5 / 3.4348774 | = 0.145565603 |
|-------------|-------------------------|-------------------|----------------|
| C^{500th} | $= 0.5 / T_{elastis}$ | = 0.5 / 1.0522 | = 0.4751948299 |

Rasio gaya geser yang dipikul kolom interior/eksterior dan gaya geser akibat gempa nominal sebagai berikut:

$$n_{int} \ge R_{int} = n_{int} \ge (S_{int} / V_N) = 9 \ge (12065.09 / 274651) = 0.3954$$

$$n_{eks} \ge R_{eks} = n_{eks} \ge (S_{eks} / V_N) = 16 \ge (10379.1 / 274651) = 0.605$$

Jadi besarnya Faktor Pengali untuk struktur $\mu = 5.3$ adalah sebagai berikut:

$$FP = \frac{\frac{0.145565603}{0.4751948299} \times 5.3 - 1.6_1 \times 0.3954}{0.605} = 1.638932$$

Faktor Pengali selengkapnya untuk seluruh bangunan yang diteliti dapat dilihat pada Tabel 3.3.

| Jenis Bangunan | Faktor Pengali |
|---------------------|----------------|
| 6-lantai 4-bentang | 1.638932 |
| 10-lantai 4-bentang | 1.733423 |
| 6-lantai 6-bentang | 1.680571 |
| 10-lantai 6-bentang | 1.786645 |

Tabel 3.3. Faktor Pengali di Tiap Bangunan

3.4. Perencanaan Balok

Berikut ini akan disajikan contoh perhitungan tulangan lentur dan geser balok berdasarkan SNI 03-2847-2002 dengan konsep *Capaciy Design*. Sebagai contoh, diambil balok interior B30 lantai 6 pada bangunan 6 lantai dengan bentang 8 meter. Lokasi balok 30 ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Denah lokasi Balok 30 lantai 6 bangunan 6 lantai dengan bentang 8 meter

3.4.1. Perhitungan Tulangan Lentur Balok

Dari perhitungan ETABS v9.07, didapatkan output gaya-gaya dalam seperti pada Tabel 3.4. Sedangkan perhitungan kombinasi pembebanan dapat dilihat pada Tabel 3.5.

Tabel 3.4. Momen Tumpuan pada Balok 30 Lantai 4 Bangunan 6 Lantai Dengan Bentang 10 meter

| | Tumpuan Kiri | Tumpuan Kanan |
|-------------------|--------------|---------------|
| M _D | -119.508 kNm | -114.318 kNm |
| M _L | -95.67 kNm | -89.037 kNm |
| M _{Emax} | 35.212 kNm | -35.037 kNm |

| Kombinasi | Tumpuan Kiri | Tumpuan Kanan |
|---|--------------|---------------|
| $K_1 = 1,4 M_D$ | -167.311 kNm | -160.045 kNm |
| $K_2 = 1,2 M_D + 1,6 M_L$ | -296.482 kNm | -279.641 kNm |
| $K_3 = 1,2 M_D + 0,5 M_L + 1,0 M_E$ | -156.033 kNm | -216.737 kNm |
| $K_4 = 1.2 \ M_D + 0.5 \ M_L - 1.0 \ M_E$ | -226.457 kNm | -146.663 kNm |
| $K_5 = 0.9 M_D + 1.0 M_E$ | -72.3452 kNm | -137.923 kNm |
| $K_6 = 0.9 M_D - 1.0 M_E$ | -142.769 kNm | -67.8492 kNm |
| Kombinasi Maksimum | -72.3452 kNm | -67.8492 kNm |
| Kombinasi Minimum | -296.482 kNm | -279.641 kNm |

Tabel 3.5. Hasil Perhitungan Kombinasi Beban

Perhitungan :

d = 0.9 x h (asumsi awal)

= 0.9 x 700 = 630 mm

Digunakan mutu beton $f_{c}\,\dot{=}\,30$ MPa dan $f_{y}=400$ MPa untuk tulangan utama.

C = T $0,85 x f_c' x a x b = A_s x f_y$ $a = (A_s x f_y) / (0,85 x f_c' x b)$ $M_n = M_u / \emptyset = T x (d - \frac{1}{2} x a)$ $M_n = A_s x f_y x (d - \frac{1}{2} x a)$ $M_n = A_s x f_y x (d - \frac{1}{2} x (A_s x f_y) / (0,85 x f_c' x b))$ $\frac{1}{2} x A_s^2 x f_y^2 / (0,85 x f_c' x b) - A_s x f_y x d + M_n = 0$

Dengan menggunakan perumusan akar-akar dari persamaan kuadrat didapat :

| • | Tulangan tumpuan kiri |
|---|---|
| Δ | - 1538 355 mm ² (Pakai 4 046 D22 \rightarrow Atas) |

$$A_s = 1538.355 \text{ mm}^2$$
 (Pakai 4.046 D22 \rightarrow Atas)

A_s' = 780.325 mm² (Pakai 2.052 D22
$$\rightarrow$$
 Bawah)

• Tulangan tumpuan kanan

$$A_s = 1449.175 \text{ mm}^2$$
 (Pakai 3.811 D22 \rightarrow Atas)

A_s' = 780.325 mm² (Pakai 2.052 D22
$$\rightarrow$$
 Bawah)

3.4.2. Perhitungan Kuat Lentur Maksimum Balok (Mpr)

Contoh perhitungan untuk B30 lokasi tumpuan kiri:

Dari perhitungan tulangan lentur didapatkan :

$$A_{s} = 1538.355 \text{ mm}^{2} (4.046 \text{ D22})$$
$$A_{s}' = 780.325 \text{ mm}^{2} (2.052 \text{ D22})$$

Kuat lentur maksimum untuk momen negatif :

d = h - tebal selimut beton - Ø tul geser -
$$\frac{1}{2}$$
Ø tul lentur
d = 700 - 40 - 12 - $\frac{1}{2}$ 22
= 637,015 mm

$$C_{C} = T$$

$$0,85 \text{ x } f_{c}' \text{ x } a \text{ x } b = 1,25 \text{ x } A_{s} \text{ x } f_{y}$$

$$a = 1.25 \text{ x } A_{s} \text{ x } f_{y} / (0,85 \text{ x } f_{c}' \text{ x } b)$$

$$= \frac{1,25 \text{ x } 1538.355 \text{ x } 400}{0,85 \text{ x } 30 \text{ x } 350}$$

$$= 86.182 \text{ mm}$$

$$M_{pr} - = A_{s} \text{ x } 1,25 \text{ x } f_{y} \text{ x } (d - \frac{1}{2} a)$$

$$= 1538.355 \text{ x } 1,25 \text{ x } 400 \text{ x } (637,015 - \frac{1}{2} \text{ x } 86.182)$$

$$= 456.833 \text{ kNm}$$

Dengan cara yang sama diperoleh $M_{pr+} = 240.01$ kNm dan untuk tumpuan kanan, $M_{pr} - = 456.833$ kNm dan $M_{pr+} = 240.01$ kNm.

3.4.3. Perhitungan Tulangan Geser Balok

Dari perhitungan ETABS, didapatkan *output* gaya-gaya dalam seperti pada Tabel 3.6. Sedangkan perhitungan kombinasi pembebanan dapat dilihat pada Tabel 3.7.

| | Tumpuan Kiri | Tumpuan Kanan |
|--------------------|--------------|---------------|
| V _D | -81.49 kN | 80.1 kN |
| V _L | -63.02 kN | 61.24 kN |
| V _{Emaks} | 9.45 kN | 9.47 kN |

Tabel 3.6. Gaya Geser pada Balok B30

Tabel 3.7. Hasil Perhitungan Kombinasi Beban

| Kombinasi | Tumpuan Kiri | Tumpuan Kanan |
|-------------------------------------|--------------|---------------|
| $K_1 = 1,4 V_D$ | -114.086 kN | 112.14 kN |
| $K_2 = 1,2 V_D + 1.6 V_L$ | -198.62 kN | 194.104 kN |
| $K_3 = 1,2 V_D + 0,5 V_L + 1,0 V_E$ | -119.848 kN | 136.21 kN |
| $K_4 = 0.9 V_D + 1.0 V_E$ | -63.891 kN | 81.56 kN |

 V_u maksimum = 198.62 kN

Menghitung besarnya gaya geser rencana (V_{ub12}) :

$$\mathbf{V}_{ub12} = \left(\frac{M_{pr1} + M_{pr2}}{l_n}\right) \pm \left[1, 2V_D + 1, 0V_L\right]$$

$$\mathbf{V}_{ub12} = \left(\frac{M_{pr1} + M_{pr2}}{l_n}\right) \pm Vgmaks$$

 $V_g = 1,2 V_D + V_L = 1,2 x 81.49 + 63.02 = 160.808 \text{ kN} \text{ (Tumpuan Kiri)}$ $V_g = 1,2 V_D + V_L = 1,2 x 80.1 + 61.24 = 157.36 \text{ kN} \text{ (Tumpuan Kanan)}$ $V_g \text{ maksimum} = 160.808 \text{ kN}$

28

Menghitung V_{ub12} untuk lokasi tumpuan kiri :

$$V_{ub1,2} = \pm V_{g maks} + \left(\frac{M_{pr1-kiri} + M_{pr2-kanan}}{l_n}\right)$$
$$V_{ub1} = 160.808 + \left(\frac{456.833 + 240.01}{7.5}\right) = 253.7204 \text{ kN}$$
$$V_{ub2} = -160.808 + \left(\frac{456.833 + 240.01}{7.5}\right) = -67.8956 \text{ kN}$$

Diagram gaya geser V_{ub1} dan V_{ub2} dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Diagram gaya geser pada daerah sendi plastis

 V_{ub_d} didapatkan sama dengan nilai V_{ub1} karena terletak pada muka kolom yaitu sebesar 253.7204 kN.

Mencari nilai V_s :

Untuk kondisi di daerah sendi plastis (0 - 2 h dari tumpuan):

Nilai V_c pada daerah sendi plastis harus dianggap sebesar nol jika :

1.
$$\left(\frac{M_{pr1} + M_{pr2}}{l_n}\right) \ge 0.5 \times V_{u \max}$$

 $\left(\frac{456.833 + 240.01}{7.5}\right) > 0.5 \times 198.62$

92.9124 kN > 99.31 kN \rightarrow NOT OK

2. $N_{ub} < A_g f_c'/20$

$$0 < A_g f_c'/20 \rightarrow OK$$

Jadi,
$$V_c = \left(\frac{456.833 + 240.01}{7.5}\right) + (58.51469 + 7.5/2) = 155.17709$$

$$V_{s} = \frac{V_{ub_{d}}}{0.55} - V_{c}$$
$$= \frac{253.7204}{0.55} - 155.17709 = 306.133 \text{ kN}$$

Perhitungan jarak sengkang (s) :

s
$$= \frac{A_{v.}f_{y.}d}{V_s}$$
$$= \frac{2 \times 0.25 \times \pi \times 12^2 \times 240 \times 635.96}{306.133 \times 10^3}$$
$$= 112.95 \text{ mm}$$
Periksa s terhadap s_{maks} dimana nilai s_{maks} diambil yang terkecil dari :

1. d/4 = 637,015 / 4 = 159.25 mm2. $8 D_{min} = 8 \times 22 = 176 \text{ mm} (s_{maks} \text{ terpilih})$ 3. $24d_b = 24 \times 12 = 288 \text{ mm}$ 4. 300 mm $s < s_{maks} \rightarrow OK$

Jadi, digunakan tulangan geser Ø12-100 mm (2 kaki).

3.5. Perencanaan Kolom Eksterior (Pseudo Elastis)

Dalam perencanaan *Pseudo* Elastis, kolom eksterior direncanakan secara elastis terhadap beban gempa besar, agar kolom tetap elastis pada saat terjadi gempa target

3.5.1. Perhitungan Tulangan Utama Kolom

3.5.1.1.Akibat Momen Lentur

Momen kolom merupakan $M_{u,k}$ yang dihitung berdasarkan momen lentur kolom maksimum dari keempat macam kombinasi pembebanan di bawah ini, yaitu:

$$\begin{split} 1. \ M_{u,k} &= 1,2 \ M_D + 1,6 \ M_L \\ 2. \ M_{u,k} &= 1,4 \ M_D \\ 3. \ M_{u,k} &= 1,2 \ M_D + 0,5 \ M_L \pm 1 \ FP \ M_E \\ 4. \ M_{u,k} &= 0,9 \ M_D \pm 1 \ FP \ M_E \end{split}$$

dimana :

 M_D = momen lentur kolom portal akibat beban mati

 M_L = momen lentur kolom portal akibat beban hidup

M_E = momen lentur kolom portal akibat beban gempa

FP = faktor pengali untuk kolom eksterior

3.5.1.2.Akibat Gaya Aksial

Gaya aksial kolom dinyatakan sebagai $N_{u,k}$ yang dihitung berdasarkan gaya aksial maksimum dari keempat macam kombinasi pembebanan berikut :

$$\begin{split} 1. \ N_{u,k} &= 1,2 \ N_D + 1,6 \ N_L \\ 2. \ N_{u,k} &= 1,4 \ N_D \\ 3. \ N_{u,k} &= 1,2 \ N_D + 0,5 \ N_L \pm 1 \ FP \ N_E \\ 4. \ N_{u,k} &= 0,9 \ N_D \pm 1 \ FP \ N_E \end{split}$$

dimana :

N_D = gaya aksial kolom akibat beban mati

 N_L = gaya aksial kolom akibat beban hidup

 N_E = gaya aksial kolom akibat beban gempa

FP = factor pengali untuk kolom eksterior

Contoh perhitungan:

Tulangan Lentur kolom:

Pada Gambar 3.3. berikut ini akan disajikan contoh perhitungan tulangan kolom portal eksterior lantai 1 untuk bangunan 10 lantai berdasarkan metode *Pseudo* Elastis.



Gambar 3.3. Portal bangunan 10 lantai

Data kolom yang digunakan adalah sebagai berikut:

| b (lebar penampang) | = 700 mm |
|---------------------------------------|-------------------------|
| h (tinggi penampang) | = 700 mm |
| f _c ' (mutu beton) | = 30 MPa |
| f _y (mutu tulangan lentur) | = 400 MPa |
| A _g (luas penampang) | $= 490000 \text{ mm}^2$ |
| d'/h | = 0.1 |

3.5.2. Akibat Momen Lentur dan Gaya Aksial

Akibat momen lentur : $M_{u,k} = 765.939 \text{ kNm}$

Akibat gaya aksial :

 $N_{u,k} = 650.251 \text{ kN}$

Besarnya tulangan kolom akibat momen lentur rencana dan gaya aksial rencana dapat dihitung dengan bantuan diagram interaksi M-N. Dengan mengetahui nilai dari $M_{u,k}$ rencana dan $N_{u,k}$ rencana, maka dapat diperoleh beberapa kombinasi M dan N antara $M_{u,k}$ -N_{u,k}. Dari kombinasi tersebut, didapatkan nilai absis dan ordinat untuk tiap kombinasi M dan N pada diagram dimana dapat diketahui dari persamaan berikut:

ABSIS =
$$M_{u,k_rencana} / (\phi \times A_{gr} \times 0.85 \times f_c')$$

ABSIS = $\frac{765939000}{0.65 \times 700 \times 700 \times 0.85 \times 30 \times 700} = 0.15$
ORDINAT = $N_{u,k_rencana} / (\phi \times A_{gr} \times 0.85 \times f_c')$
ORDINAT = $\frac{650000}{0.65 \times 700 \times 700 \times 0.85 \times 30} = 0.08$
 ϕ = Faktor reduksi kekuatan

A_{gr} = Luas penampang bruto kolom
 h = Tinggi penampang kolom

Setelah nilai absis dan ordinat diketahui, kemudian dicari besarnya r dari diagram interaksi M-N. Faktor β adalah koefisien yang besarnya tergantung dari mutu beton. Langkah berikutnya mencari besarnya ρ dari persamaan:

$$\rho = r \ge \beta$$

 $\rho = 0.014 \ge 1.2 = 0.0168$

Dari kombinasi tersebut dipilih ρ terbesar. Selanjutnya besar tulangan kolom dapat dihitung dengan rumus :

$$A_{s} = \rho \ x \ A_{gr}$$
$$A_{s} = 0.0168 \ x \ 700 \ x \ 700 = 8232 \ mm^{2} \ (8D33,22)$$

3.5.3. Perhitungan Tulangan Geser Kolom Eksterior

Mencari besaran V_{u,k}:

$$V_{u,k} = M_{u, ka} + M_{u, kb} / h_n$$
$$V_{u,k} = \frac{765.94 + 273.57}{2} = 371.25 kN$$

2.8

Mencari besaran V_s :

Pada daerah plastis, kontribusi beton dalam memikul geser (V_c) harus dianggap 0 bila:

$$\mathbf{V}_{s} = \frac{\mathbf{V}_{u}}{\boldsymbol{\varphi}} - \mathbf{V}_{c}$$

$$V_s = \frac{371.25}{0.55} - 0 = 675 \text{kN}$$

Mencari besaran S:

Menggunakan sengkang dengan 3 kaki

 $S = A_v x f_y x d / V_s$

Besarnya s_{max} diambil nilai terkecil dari :

- 1. $s_{max} = h_{kolom} / 4 = 700 / 4 = 175 \text{ mm}$
- 2. $s_{max} = 6D_{lentur} = 6 \times 33.22 = 199.32 \text{ mm}$

3.
$$s_{max} = 100 + (350 - h_x) / 3$$

= 100 + (350-302) / 3
= 116 mm > 100 mm $\rightarrow s_{max} = 116$ mm

 $s_{max} = 116 \text{ mm}$

Jadi, digunakan sengkang D12-116 mm (3 kaki).

3.6. Perencanaan Kolom Interior (*Pseudo* Elastis)

3.6.1. Perhitungan Tulangan Utama Kolom

3.6.1.1.Akibat Momen Lentur

Momen kolom dinyatakan sebagai M_{u,k} yang dihitung berdasarkan momen lentur kolom maksimum dari keempat macam kombinasi pembebanan di bawah ini, yaitu:

$$\begin{split} &1.\ M_{u,k}=1,2\ M_D+1,6\ M_L\\ &2.\ M_{u,k}=1,4\ M_D\\ &3.\ M_{u,k}=1,2\ M_D+0,5\ M_L\pm1\ M_E\\ &4.\ M_{u,k}=0,9\ M_D\pm1\ M_E\\ &dimana:\\ &M_D=momen \ lentur\ kolom\ portal\ akibat\ beban\ mati\\ &M_L=momen\ lentur\ kolom\ portal\ akibat\ beban\ hidup \end{split}$$

M_E = momen lentur kolom portal akibat beban gempa

3.6.1.2.Akibat Gaya Aksial

Gaya aksial kolom dinyatakan sebagai $N_{u,k}$ yang dihitung berdasarkan gaya aksial maksimum dari keempat macam kombinasi pembebanan berikut :

$$\begin{split} 1. \ N_{u,k} &= 1,2 \ N_D + 1,6 \ N_L \\ 2. \ N_{u,k} &= 1,4 \ N_D \\ 3. \ N_{u,k} &= 1,2 \ N_D + 0,5 \ N_L \pm 1 \ N_E \\ 4. \ N_{u,k} &= 0,9 \ N_D \pm 1 \ N_E \\ dimana : \end{split}$$

N_D = gaya aksial kolom akibat beban mati

 N_L = gaya aksial kolom akibat beban hidup

 N_E = gaya aksial kolom akibat beban gempa

Selanjutnya cara perhitungan tulangan lentur dan geser serupa dengan cara perhitungan tulangan eksterior.

3.7. Analisis Moment-Curvature dengan Menggunakan Program ESDAP

Evaluasi Analisis Statik *Non-Linear Pushover* dan Analisis Dinamik *Time History* dengan menggunakan program ETABS v 9.0.7 dan RUAUMOKO 3D memerlukan input hubungan Momen-*Curvature* dari *hinge properties* yang direncanakan. Untuk mendapatkan nilai *hinge properties* bagi balok dan kolom, maka pada penelitian ini perlu dicari dahulu grafik hubungan momen kurvatur dengan bantuan program ESDAP (Lidyawati dan Pono, 2003) yang disederhanakan dalam bentuk grafik bilinear.

Berikut akan disajikan cara penggunaan program ESDAP tersebut serta proses penyederhanaan grafik hubungan momen *curvature* menjadi grafik bilinier. Sebagai contoh akan diambil tumpuan kiri balok interior (B30) lantai 6 pada bangunan 4 bentang 6 lantai. Data-data yang diperlukan untuk dimasukkan ke program ESDAP adalah sbb:

| Dimensi | $= 350 \text{ x} 700 \text{ mm}^2$ |
|-------------------------------|--|
| Jumlah tulangan lentur | = $6.098 \text{ D} 22 \text{ (f}_{y} = 400 \text{ MPa})$ |
| Luas tulangan lentur | $= 1538.355 \text{ mm}^2$ |
| Jumlah tulangan atas | = 4.046 D 22 |
| Jumlah tulangan bawah | = 2.052 D 22 |
| Jumlah tulangan geser | = 2 Ø 12-92.7 (f_y = 240 MPa) |
| Mutu beton (f _c ') | = 30 MPa |

Dalam menggunakan program ESDAP untuk menampilkan grafik momen *curvature* bilinier perlu adanya masukan data secara terpisah untuk momen positif dan momen negatif, hal ini dikarenakan tidak tersedianya fasilitas untuk memasukkan data-data tersebut secara sekaligus. Contoh inputan data untuk momen negatif pada Gambar 3.4. beserta grafik momen *curvature* pada Gambar 3.5. dan tabel hasil analisis momen *curvature* yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 3.8.



Gambar 3.4. Inputan data



Gambar 3.5. Grafik Momen Curvature

| Analysis Results Report | | | | | |
|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|-----------------|------------|
| | | Moment-C | urvature Table | | |
| No. Cycles | Concrete Strain (mm) | Neutral Axis (mm) | Steel Strain (mm) | Moment (kNm) | Curvature |
| 1 | 0.00020000 | 740.5459 | 0.00006496 | 55.78 | 0.00027007 |
| 2 | 0.00030000 | 466.8201 | -0.00002132 | 125.04 | 0.00064265 |
| 3 | 0.00040000 | 361.6418 | -0.00015303 | 171.71 | 0.00110607 |
| 4 | 0.00050000 | 303.1727 | -0.00032461 | 208.83 | 0.00164923 |
| 5 | 0.00060000 | 267.1443 | -0.00052299 | 242.53 | 0.00224598 |
| 6 | 0.00070000 | 243.3487 | -0.00073827 | 274.73 | 0.00287653 |
| 7 | 0.00080000 | 226.8317 | -0.00096342 | 306.03 | 0.00352684 |
| 8 | 0.00090000 | 214.9411 | -0.00119360 | 336.59 | 0.00418719 |
| 9 | 0.00100000 | 206.1483 | -0.00142544 | 366.42 | 0.00485088 |
| 10 | 0.00110000 | 199.5164 | -0.00165666 | 395.48 | 0.00551333 |
| 11 | 0.00120000 | 194.4436 | -0.00188573 | 423.74 | 0.00617145 |
| 12 | 0.00130000 | 187.7035 | -0.00216291 | 442.66 | 0.00692582 |
| 13 | 0.00140000 | 179.2912 | -0.00250426 | 451.32 | 0.00780852 |
| 14 | 0.00150000 | 171.9101 | -0.00286275 | 458.33 | 0.00872549 |
| 15 | 0.00160000 | 165.4024 | -0.00323669 | 464.06 | 0.00967338 |
| 16 | 0.00180000 | 154.5212 | -0.00402444 | 472.78 | 0.01164889 |
| 17 | 0.00200000 | 145.8357 | -0.00485703 | 478.95 | 0.01371407 |
| 18 | 0.00250000 | 130.4490 | -0.00708229 | 488.18 | 0.01916458 |
| 19 | 0.00300000 | 120,4260 | -0.00945578 | 492.86 | 0.02491157 |
| 20 | 0.00350000 | 113.3355 | -0.01194088 | 495.45 | 0.03088176 |
| 21 | 0.00400000 | 110.4637 | -0.01410549 | 495.50 | 0.03621099 |
| 22 | 0.00450000 | 109.7300 | -0.01000375 | 493.9Z | 0.04100751 |
| 23 | 0.00500000 | 110.4752 | -0.01762950 | 490.86 | 0.04525901 |
| 24 | 0.00600000 | 114.9535 | -0.02009751 | 481.52 | 0.05219503 |
| 25 | 0.00700000 | 120.0849 | -0.02214606 | 471.46 | 0.05829211 |
| 26 | 0.00800000 | 122.2535 | -0.02471891 | 466.28 | 0.06543781 |
| 27 | 0.00900000 | 121.9374 | -0.02790419 | 465.01 | 0.07380838 |
| 28 | 0.01000000 | 122.8906 | -0.03068658 | 474.19 | 0.08137316 |
| 29 | 0.01200000 | 124.5801 | -0.03616179 | 490.00 | 0.09632357 |
| 30 | 0.01400000 | 126.2233 | -0.04145726 | 502.05 | 0.11091452 |
| 31 | 0.01600000 | 127.8812 | -0.04655804 | 511.14 | 0.12511608 |
| 32 | 0.01800000 | 129.4529 | -0.05152336 | 518.20 | 0.13904672 |
| 33 | 0.02000000 | 130.9841 | -0.05634514 | 523.72 | 0.15269028 |

ulto Donort ٨ a alvaia Daa

Analysis Results :

Iteration stopped at the condition of : Concrete Strain Exceeds Maximum Maximum Moment = 523.718 kNm Calculated Ideal Moment = 495.503 kNm : equals Maximum Moment 80% of Maximum Moment = 418.975 kNm Maximum Concrete Strain = 0.019147906500 Steel Limit Strain = 0.168 Yield Curvature = 0.00743888682769504

Proses penginputan data untuk momen positif tidak sama dengan momen negatif. Perlu adanya sedikit modifikasi perbandingan tulangan tekan dengan tulangan tarik yaitu sebesar 1:1, hal ini dikarenakan adanya *error* pada program ESDAP untuk kasus apabila jumlah tulangan tekan lebih besar daripada jumlah tulangan tarik. Berikut ini data modifikasi yang digunakan untuk momen positif beserta input data tersebut ke ESDAP pada Gambar 3.6.

| Dimensi | $= 350 \text{ x } 700 \text{ mm}^2$ |
|------------------------|-------------------------------------|
| Jumlah tulangan lentur | = 6.098 D 22 (f_y = 400 MPa) |
| Luas tulangan lentur | $= 1538.355 \text{ mm}^2$ |
| Jumlah tulangan atas | = 4.046 D 22 |
| Jumlah tulangan bawah | = 2.052 D 22 |
| Luas tulangan bawah | $= 780.325 \text{ mm}^2$ |
| Jumlah tulangan geser | = 2 Ø 12-92 (f_y = 240 MPa) |
| Mutu beton (f_c) | = 30 Mpa |



Gambar 3.6. Input data balok untuk Momen Positif

Adapun grafik momen *curvature* secara keseluruhan yang merupakan gabungan dari momen positif dan momen negatif seperti terlihat pada Gambar 3.7. Sumbu vertikal positif menggambarkan momen positif, sedangkan sumbu vertikal negatif menggambarkan momen negatif.



Gambar 3.7. Kurva *Moment-Curvature* dari Program ESDAP yang telah digabungkan untuk Momen Positif dan Negatif

Deformasi plastis yang terjadi pada penelitian ini diasumsikan linier sehingga grafik *moment-curvature* pada Gambar 3.7. dimodifikasi menjadi linier. Modifikasi yang dilakukan adalah dari titik 0 ditarik garis lurus menuju titik leleh, kemudian dari titik leleh ditarik garis lurus menuju titik *ultimate*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.8. berikut ini.



Gambar 3.8. Kurva Moment-Curvature Bilinier

3.8. Input *Hinge Properties* pada Balok

Nilai dari *hinge properties* diberikan di daerah yang diharapkan terjadi sendi plastis yaitu di daerah tumpuan pada balok dan kolom. *Hinge properties* ini dimasukkan hanya untuk M3 saja karena pada struktur balok yang menentukan adalah kegagalan lentur.

Data-data berupa hubungan antara *moment-rotation* (M- θ), nilai *yield moment* (M_y), *yield rotation* (θ_y), *ultimate moment* (M_u) dan *ultimate rotation* (θ_u) diperlukan untuk memasukkan data *hinge properties* penampang balok dengan posisi dan jumlah tulangan tertentu. Data-data tersebut bisa diperoleh dari grafik *moment-curvature* yang telah diolah terlebih dahulu. Perlu diingat bahwa hasil program ESDAP adalah grafik *moment-curvature*, sedangkan input yang dibutuhkan pada program ETABS v 9.07 adalah grafik *moment-rotation*. Berikut ini dijelaskan hubungan antara *rotation* dengan *curvature* :

$$\phi = \frac{M}{EI} \tag{3.4}$$

$$\theta = \int_{a}^{b} \frac{M}{EI} dx \tag{3.5}$$

$$\theta = \frac{M}{EI} l_p \tag{3.6}$$

dimana :

- ϕ =*curvature*
- θ = rotasi (*rotation*)
- M = momen (*moment*)
- EI = kekakuan (*stiffness*)
- l_p = panjang sendi plastis (*plastic hinge length*)
- a= titik awal dari sendi plastis
- b= titik akhir dari sendi plastis

Berdasarkan Persamaan (3.5), rotation merupakan hasil integrasi M/EI

pada daerah sepanjang sendi plastis. Dengan mengasumsi bahwa momen di sepanjang sendi plastis adalah konstan, maka diperoleh Persamaan (3.6). Dengan demikian *rotation* merupakan hasil perkalian antara *curvature* dengan *plastic hinge length*. Panjang sendi plastis untuk struktur balok diambil sebesar 0,5 h (ATC 40,1997). Berikut ditampilkan contoh *input* data *hinge properties* untuk balok eksterior lantai 1 pada bangunan 10 lantai :

Penentuan letak titik A, B, C, D, E pada kurva *moment-curvature* dapat dilihat pada Gambar 3.9. Panjang sendi plastis = 0.5 h = 0.5 x 700 = 350 mm.



Gambar 3.9. Penentuan letak titik A, B, C, D, E

Adapun input data hinge properties diolah dari output:

Titik A \rightarrow Titik dimana penampang belum menerima pembebanan. A = (0;0)

Titik B \rightarrow Titik dimana penampang mengalami leleh pertama kali. B = (*yield moment*; *yield rotation*)

ESDAP tidak memberikan nilai *yield moment* sehingga untuk menghitung *yield moment* perlu dilakukan interpolasi dari *output yield curvature*.

Yield Curvature + = 0.0045746 rad/m Yield Curvature - = 0.0045629 rad/m Dari output ESDAP yang berupa *yield curvature* didapatkan (dengan interpolasi):

Yield Moment + = 388.93871 kNm

Yield Moment - = 389.3191 kNm

Sedangkan *yield rotation* didapat dengan mengalikan *yield curvature* dengan panjang sendi plastis.

Yield Rotation + = 0.0045746 x 0,35 = 0,00160111 rad *Yield Rotation* - = 0.0045629 x 0,35 = 0.001597015 rad

Nilai *yield moment* dan *yield rotation* ini menjadi faktor skala (MSF dan RSF) untuk *input* data *hinge property* sehingga semua nilai yang ada dalam grafik merupakan hasil pembagian dari nilai sesungguhnya dengan faktor skala. Dalam ETABS v 9.07, nilai deformasi elastis diabaikan sehingga titik B mempunyai koordinat (1;0).

Titik C \rightarrow Titik dimana penampang berada pada kondisi *ultimate*.

C = (*ultimate moment* ; *ultimate rotation*)

| Ultimate Moment + | = 550.62 kNm | |
|------------------------------|--------------------|----------------------------|
| Ultimate Moment - | = 549.75 kNm | Output ESDAP |
| Ultimate Curvature + | = 0.1352612 rad/m | > |
| Ultimate Curvature - | = 0.1334794 rad/m | |
| C = 550.62 / 388.938 | 71 = 1.415699 | |
| C- = -(549.75 / 389.31 | 91) = -1.4121 | > Input ETABS – M/MSF |
| C = 0.1352612/0.0043 | 5746 = 29.5679 |] |
| $C- = -(0.1334794 \ / \ 0.0$ | 045629) = -29.2532 | <i>Input</i> ETABS – R/RSF |

Data yang diperlukan untuk menganalisis sebenarnya hanya sampai pada titik C (kondisi *ultimate*, namun pada peng-*input*-an pada ETABS v 9.07 harus meng-*input*-kan titik D dan E maka titik D dan E dihimpitkan terhadap titik C dengan asumsi sebagai berikut:

Titik D \rightarrow Titik setelah kondisi *ultimate* penampang, yang diambil dari ekstrapolasi nilai C sebesar 1,01 baik untuk *moment* maupun *rotation*. Titik E \rightarrow Titik setelah kondisi *ultimate* penampang, yang diambil dari ekstrapolasi nilai C sebesar 1,02 baik untuk *moment* maupun *rotation*.

Penentuan titik IO, LS, dan CP ini disesuikan dengan kriteria *damage index* berdasarkan ACMC dimana untuk tingkat *Serviceability Limit State*, *damage index* mempunyai nilai antara 0,1-0,25. Untuk tingkat *Damage Control State*, *damage index* mempunyai nilai antara 0,25-0,4. Sedangkan untuk tingkat *Safety Limit State*, *damage index* mempunyai nilai antara 0,4-1,0.

Titik IO \rightarrow Titik dimana *plastic rotation* mempunyai nilai sebesar 10 % kondisi setelah penampang mengalami leleh pertama kali (dari titik B).

IO Positive =
$$\frac{0.0045746 + 0.1 \times (0.1352612 - 0.0045746)}{0.0045746} = 3.9$$

IO Negative =
$$-\left(\frac{0.0045629 + 0.1 \times (0.1334794 - 0.0045629)}{0.0045629}\right) = -3.8$$

Titik LS→ Titik dimana *plastic rotation* mempunyai nilai sebesar 25 % kondisi setelah penampang mengalami leleh pertama kali (dari titik B).

LS Positive =
$$\frac{0.0045746 + 0.25 \times (0.1352612 - 0.0045746)}{0.0045746} = 8.1$$

LS Negative =
$$-\frac{0.0045629 + 0.25 \times (0.1334794 - 0.0045629)}{0.0045629} = -8.1$$

Titik CP→ Titik dimana *plastic rotation* mempunyai nilai sebesar 40 % kondisi setelah penampang mengalami leleh pertama kali (dari titik B).

$$CP \ Positive = \frac{0.0045746 + 0.4 \times (0.1352612 - 0.0045746)}{0.0045746} = 12.4$$

$$CP \ Negative = -\frac{0.0045629 + 0.4 \times (0.1334794 - 0.0045629)}{0.0045629} = -12.3$$

Setelah koordinat semua titik diperoleh, maka langkah selanjutnya adalah proses *input* data pada *hinge properties* balok pada program ETABS v 9.07. Gambar 3.10. menunjukkan *input* data *hinge properties* pada balok BE lantai 6 pada bangunan 6 lantai. Sumbu positif mewakili nilai momen positif, sedangkan sumbu negatif mewakili nilai momen negatif.

| E- -1.4403 -29.8383 D- -1.4262 -29.5457 C- -1.4121 -29.2532 B- -1 0 A 0 0 B 1 0 C 1.4157 29.5677 D 1.4293 29.8634 E 1.444 30.1591 Scaling for Moment and Rotation Positive Negative Use Yield Moment Moment SF 3.905E+08 6.974E+08 Use Yield Rotation Rotation SF 1.601E-03 1.597E-03 | Point | Moment/SF | Rotal | tion/SF | |
|--|-------------------|--|---------------|----------|--------------------------|
| D- -1.4262 -29.5457 C- -1.4121 -29.2532 B- -1 0 A 0 0 B 1 0 C 1.4157 29.5677 D 1.4299 29.8634 E 1.444 30.1591 Scaling for Moment and Rotation Ouse Yield Moment Moment SF 3.905E+08 Use Yield Rotation Rotation SF 1.601E-03 Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF) Positive Negative | E- | -1.4403 | -29. | .8383 | |
| C: -1.4121 -29.2532 B: -1 0 A 0 0 B 1 0 C 1.4157 29.5677 D 1.4299 29.8634 E 1.444 30.1591 Scaling for Moment and Rotation Positive Negative Use Yield Moment Moment SF 3.905E+08 6.974E+08 Use Yield Rotation Rotation SF 1.601E-03 1.597E-03 | D- | -1.4262 | -29. | 5457 | |
| B- .1 0 A 0 0 B 1 0 C 1.4157 29.5677 D 1.4299 29.8634 E 1.444 30.1591 Scaling for Moment and Rotation Positive Negative Use Yield Moment Moment SF 3.905E+08 6.974E+08 Use Yield Rotation Rotation SF 1.601E-03 1.597E-03 | C- | -1.4121 | -29. | .2532 | |
| A 0 0 B 1 0 C 1.4157 29.5677 D 1.4299 29.8634 E 1.444 30.1591 Scaling for Moment and Rotation Positive Negative Cuse Yield Moment Moment SF 3.905E+08 6.974E+08 Use Yield Rotation Rotation SF 1.601E-03 1.597E-03 | B- | -1 | | 0 | |
| B 1 0 C 1.4157 29.5677 D 1.4299 29.8634 E 1.444 30.1591 Scaling for Moment and Rotation Symmetric Scaling for Moment and Rotation Positive Use Yield Moment Moment SF J.use Yield Rotation Rotation SF Ouse Yield Rotation Rotation SF Positive Negative Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF) Positive | Α | 0 | | 0 | |
| C 1.4157 29.5677 D 1.4299 29.8634 E 1.444 30.1591 Scaling for Moment and Rotation Positive Negative Use Yield Moment Moment SF 3.905E+08 6.974E+08 Use Yield Rotation Rotation SF 1.601E-03 1.597E-03 | В | 1 | | 0 | |
| D 1.4299 29.8634 E 1.444 30.1591 Scaling for Moment and Rotation Symmetric □ Use Yield Moment Moment SF 0 Use Yield Rotation Rotation SF 1.601E-03 1.597E-03 Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF) Positive Positive Negative | С | 1.4157 | 29. | 5677 | |
| E 1.444 30.1591 Implementation Scaling for Moment and Rotation Positive Negative I Use Yield Moment Moment SF 3.905E+08 6.974E+08 I Use Yield Rotation Rotation SF 1.601E-03 1.597E-03 Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF) Positive Negative | D | 1.4299 | 29. | 8634 | V Hingo is Digid Plastic |
| Scaling for Moment and Rotation Positive Negative Output Use Yield Moment Moment SF 3.905E+08 6.974E+08 Output Use Yield Rotation Rotation SF 1.601E-03 1.597E-03 Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF) Positive Negative | E | 1.444 | 30. | 1591 | minge is nigiti nastit |
| Immediate Occupancy 3.9 -3.8 | Accepta | nce Criteria (Plastic ate Occupancy | o Hotation/SF | Positive | Negative -3.8 |
| Life Safety 8.1 -8.1 | Immedi | | | 8.1 | -8.1 |
| Collapse Prevention 12.4 -12.3 | Immedi Life Sa | fety | | | |

Gambar 3.10. *Input* data *Hinge Properties* pada Balok BE lantai 1 pada bangunan 10 lantai

45

3.9. Input *Hinge Properties* pada Kolom

Data *hinge properties* untuk elemen kolom adalah model P-M2-M3, yang mempunyai arti bahwa terjadinya sendi plastis terjadi karena interaksi gaya aksial (P) dan momen (M) sumbu lokal 2 dan sumbu lokal 3. Posisi sumbu lokal 2 dan sumbu lokal 3 pada kolom dapat dilihat pada Gambar 3.11.

Dalam penelitian ini, setiap kolom pada bangunan yang ditinjau memiliki kapasitas momen sumbu lokal 2 yang sama dengan kapasitas momen sumbu lokal 3. Hal ini disebabkan karena dimensi kolom berbentuk persegi dan tulangan kolom yang ada tersebar pada keempat sisinya secara merata.



Gambar 3.11. Posisi sumbu lokal kolom pada ETABS v 9.07

Sama seperti *hinge properties* balok, data yang dimasukkan adalah hubungan antara *moment-rotation* (M- θ), *yield rotation* (θ_y), *ultimate moment* (M_u) dan *ultimate rotation* (θ_u) yang merupakan hasil analisis dari *momentcurvature* program ESDAP. Perbedaannya dengan balok, yaitu pada kolom, tidak perlu memasukan nilai *yield moment*. Hal ini dikarenakan program ETABS v 9.07 dapat menghitung sendiri besarnya *yield moment* ini berdasarkan grafik P-M-M *interaction surface*. Grafik P-M-M *interaction surface* ini tidak perlu di-*input* secara manual karena program ETABS v 9.07 dapat menggambarkan grafik ini berdasarkan tulangan yang telah ditentukan pada penampang kolom (pada *option define, frame sections*). Untuk mengaktifkan fungsi tersebut, kita perlu dipilih *option frame hinge interaction surface* \rightarrow *concrete, ACI 318-95 with phi=1* pada *input hinge properties* kolom, pada *option show / define interaction*.

Secara teoritis, grafik *moment-rotation* untuk penampang kolom sulit untuk ditentukan. Hal ini disebabkan karena gaya aksial yang bekerja pada kolom selalu berubah-ubah ketika bangunan dibebani oleh beban gempa. Untuk itu, pada penelitian ini dipakai gaya aksial yang sesuai dengan kombinasi pembebanan ketika terjadi gempa berupa beban statis sebesar 1,2D + 0,5L dalam penentuan grafik *moment-rotation* untuk kolom.

Proses perhitungan dan penentuan koordinat titik A, B, C, D, E, IO, LS, CP untuk *input hinge properties* kolom sama dengan pada balok. Berdasarkan ATC-40 (1997), untuk kolom panjang sendi plastis diambil sebesar 0,5 h. Berikut ini diberikan contoh hasil perhitungan koordinat titik-titik untuk kolom sudit lantai 1 pada bangunan 10 lantai yang didesain dengan metode *Pseudo* Elastis. Panjang sendi plastis = 0,5 h = 0,5 x 700 = 350 mm.

Langkah selanjutnya adalah memasukkan nilai – nilai koordinat titik A, B, C, D, E, IO, LS, CP. Pada *Frame Hinge Property Data* yang ada pada program ETABS 9.0.7 seperti pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12. *Frame Hinge Property Data* yang ada pada Program ETABS 9.0.7

Selanjutnya adalah menentukan P-M-M *interaction surface* secara otomatis pada program ETABS v9.07 seperti pada Gambar 3.13.

| Steel, AISC-L Expected Yi | RFD Equations H eld Strength | 1-1a and H1-1b wi | th phi = 1 |
|------------------------------|----------------------------------|-------------------|------------|
| Steel, FEMA : Expected Yi | 273 Equation 5-4 eld Strength | | |
| Concrete, AC | 318-95 with phi | =1 | |
| User Definition | n ymmetric about M | 2 and M3 | |
| Number of C | urves | | |

Gambar 3.13. P-M-M Interaction Surface

3.9.1. Penentuan Letak Sendi Plastis

Letak sendi plastis pada Analisis *static nonlinear pushover* dinyatakan dengan posisi 0 dan 1. Posisi ini relatif terhadap bentang bersih *member* yang bersangkutan. Posisi 0 menyatakan posisi awal dari bentang bersih *member*, sedangkan posisi 1 menyatakan posisi akhir dari bentang bersih *member*. Kedua posisi ini terletak pada tepi muka *member*. Panjang sendi plastis diambil 0.5 h baik pada balok dan kolom. Gambar 3.14. menunjukkan cara penentuan letak sendi plastis.

| Assign Frame Hinge | s (Pushover) | |
|--|----------------------------|-------------------------|
| Frame Hinge Data Hinge Property KA KA KA | Relative Distance 0. 1. 1. | Add Modify Delete |
| [| OK | Cancel |

Gambar 3.14. Penentuan letak sendi plastis

48

Cara mendeskripsikan properti sendi plastis pada elemen balok dan kolom di struktur yang diteliti adalah dengan mengubah tampilan bangunan menjadi 2 dimensi dengan memilih *set elevation view* pada *tools* yang ada di ETABS lalu kolom atau balok dipilih untuk dideskripsikan sendi plastisnya berdasarkan properti sendi plastis yang telah didefinisikan sebelumya. Hal ini dilakukan sampai semua elemen balok dan kolom selesai dideskripsikan properti sendi plastisnya.

3.10. Analisis Kinerja Struktur

Struktur bangunan akan dianalisis dengan menggunakan 2 metode yaitu secara *static nonlinear pushover* dengan menggunakan program ETABS 9.0.7 dan *dynamic nonlinear time history* dengan menggunakan program RUAUMOKO 3D. Beban gempa yang digunakan dalam Analisis *non linear time history* adalah Gempa El Centro 18 Mei 1940 N-S yang dimodifikasi sesuai dengan *respons spectrum* SNI 03-1726-2002 untuk wilayah 2 peta gempa Indonesia.

3.10.1. Analisis Static Nonlinear Pushover

Metode yang digunakan dalam analisis *statik nonlinear pushover* ini adalah memberikan pola beban statik tertentu dalam arah lateral yang ditingkatkan secara bertahap. Penambahan beban statik ini dihentikan sampai struktur tersebut mencapai target *displacement* tertentu atau mencapai pola keruntuhan tertentu. Pada *static pushover case* dibuat dua macam kondisi pembebanan, di mana yang pertama adalah pembebanan akibat beban gravitasi dan yang kedua adalah akibat beban lateral.

Dalam studi ini, beban gravitasi yang digunakan adalah beban mati dengan koefisien pembebanan 1,0 dan beban hidup dengan koefisien pembebanan 0,5. Pada *static pushover case* dipilih *push to load level defined by pattern*, karena beban gravitasi yang akan bekerja sudah diketahui besarnya melalui perhitungan. Pada penelitian ini *pushover case* untuk beban gravitasi diberi nama PUSH1. Efek *nonlinier* geometri dan material struktur diberikan melalui efek P- Δ dan hubungan antara momen-*curvature* dari penampang elemen struktur yang telah dimasukkan. Karena pada tahap pembebanan gravitasi tidak diinginkan terjadinya keruntuhan

elemen struktur maka pada opsi *Member Unloading Method* dipilih *Unload Entire Structure* agar dapat diketahui terlebih dahulu apakah terjadi keruntuhan lokal pada elemen struktur. Contoh masukan *pushover case* untuk beban gravitasi dapat dilihat pada Gambar 3.15.

| Static Nonlinear C | ase Name | PUSH1 | |
|--|-------------------------|-----------------------------|-----------------|
| Options | | | |
| Load to Level Defined by Patte | m | Minimum Saved Steps | 1 |
| 🔘 Push to Disp. Magnitude | | Maximum Null Steps | 50 |
| 🗌 Use Conjugate Displ. for Co | introl | Maximum Total Steps | 200 |
| Monitor UZ 💌 23 | STORY6 💌 | Maximum Iterations/Ste | ep 10 |
| Start from Previous Case | - | Iteration Tolerance | 1.000E-04 |
| Save Positive Increments Only | | Event Tolerance | 0.01 |
| fember Unloading Method | | ⊂ Geometric Nonlinearity Ef | fects |
| Unload Entire Structure | - | P-Delta | - |
| Load Pattern Load Scale Factor | | Active Structure Activ | ve Group |
| DEAD 1. LIVE 0.5 | Add Modify Delete | Loads Apply to Adde | d Elements Only |

Gambar 3.15. Masukan data Pushover Case untuk beban gravitasi

Setelah kondisi pembebanan pertama selesai dilakukan, maka dilanjutkan oleh pembebanan yang kedua, yaitu beban lateral dengan *scale factor* 1. Untuk pembebanan kedua, digunakan *push to displacement magnitude* yang artinya Analisis Statis Non-Linear *Pushover* dilakukan hingga target *displacement* tercapai. Pola pembebanan yang diberikan secara berangsur-angsur adalah sesuai dengan pola beban statis ekuivalen. Keadaan awal untuk kondisi pembebanan ini diambil dari kondisi Analisis Statis *Non-Linear Pushover* sebelumnya, yaitu pada

pushover case PUSH1. Untuk simpangan target yang ingin dicapai digunakan sesuai dengan *default* program ETABS v9.0.7 yaitu sebesar 0,04 kali tinggi bangunan total agar *pushover* yang dilakukan dapat melampaui batas maksimal *drift* ACMC yaitu sebesar 0,02 sehingga kerusakan dapat diidentifikasi.

Untuk Member Unloading Method dipilih Apply Local Redistribution, ini dimaksudkan agar pembebanan yang dilakukan pada tahap kedua ini dapat melanjutkan pembebanan pada tahap pertama. Sedangkan untuk efek non-linier geometri dan material dari struktur diberikan melalui P- Δ effect dan hubungan antara moment-rotation dari penampang elemen struktur yang telah di-input-kan. Pada penelitian ini pushover case untuk beban lateral akibat gempa diberi nama PUSH2. Pada bagian monitor diisikan Uy karena bangunan ini bergerak dalam arah y pada mode 1 dan titik control diisikan 15 yang terletak pada lantai atap. Contoh masukan pushover case untuk beban lateral dapat dilihat pada Gambar 3.16.

| Static Nonlinear Case Name | PUSH2 | |
|------------------------------------|--------------------------------|-----------|
| Options | | |
| C Load to Level Defined by Pattern | Minimum Saved Steps | 10 |
| Push to Disp. Magnitude 840 | Maximum Null Steps | 50 |
| 🗹 Use Conjugate Displ. for Control | Maximum Total Steps | 200 |
| Monitor UX 🔻 23 STORY6 💌 | Maximum Iterations/Step | 10 |
| Start from Previous Case PUSH1 💌 | Iteration Tolerance | 1.000E-04 |
| Save Positive Increments Only | Event Tolerance | 0.01 |
| Apply Local Redistribution | P-Delta | |
| Load Scale Factor | Active Structure Active Gro | oup |
| QUAKE 💌 1. | Stage ALL | ▼ Add |
| QUAKE 1. Add | 1 ALL | Modify |
| Modify | | Insert |
| Delete | | Delete |
| | | |

Gambar 3.16. Contoh Input Pushover Case untuk beban lateral

3.10.2. Kinerja Struktur

Program ETABS v 9.07 dapat menampilkan hasil analisis berupa *Static Pushover Curve*. Untuk mengetahui *Performance Point* dari struktur akibat gempa periode ulang 500 tahun, maka diperlukan data berupa C_a dan C_v . Besar nilai C_a didapat dari *Peak Ground Acceleration*. *Peak Ground Acceleration* (PGA) ialah percepatan muka tanah maksimum pada suatu wilayah, untuk gempa rencana periode ulang 500 tahun. PGA untuk tiap wilayah gempa dan jenis tanah telah ditentukan pada SNI 03-1726-02. Besarnya $C_a = 0,2$ dan $C_v = 0,5$ untuk jenis tanah lunak Pada wilayah 2 peta gempa Indonesia . Harga C_a dan C_v ini kemudian di*-input*-kan ke dalam program ETABS v9.07 sehingga didapatkan *Performance Point*. Pada Gambar 3.17. berikut ditampilkan contoh *input* pada program ETABS v9.07 untuk mengetahui *Performance Point* akibat gempa periode ulang 500 tahun.



Gambar 3.17. Contoh *Input* pada Program ETABS v 9.07 untuk mengetahui *Performance Point* struktur

Besarnya nilai *damping ratios* di-*input*-kan 2 *damping ratios* yaitu *damping ratio* respons spektrum elastis bernilai 0,05 dan *damping ratio* respons spektrum *demand* (besarnya sama dengan β_{eff}). Untuk menentukan tipe bangunan yang sesuai, dapat dilihat batasan-batasan dari tipe keadaan bangunan pada Tabel 3.9. berikut ini.

| Shaking Duration | Essentially New Building | Average Existing Building | Poor Existing Building |
|---------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Short | Type A | Type B | Type C |
| Long | Type B | Type C | Type C |

Tabel 3.9. Tipe Bangunan Berdasarkan ATC-40 (1997)

Pada penelitian ini, dipakai bangunan baru sehingga tipe bangunan yang dipakai adalah tipe A untuk *short shaking duration*. Kemudian untuk mengetahui *step* yang sesuai dengan *performance point* bangunan, maka dipilih *File* \rightarrow *Display Table*. *Step* ini diperlukan untuk mengetahui kinerja bangunan pada saat *performance point*. Dengan demikian letak sendi plastis dapat diketahui beserta tingkat kerusakannya.

3.11. Analisis Dinamis Time History Non-Linier dengan RUAUMOKO 3D

Program RUAUMOKO adalah program yang dibuat untuk dapat menganalisis kinerja bangunan yang berupa struktur rangka 2D dan 3D secara nonlinear terhadap beban yang berupa percepatan tanah. Program ini juga dapat digunakan untuk menganalisis kinerja bangunan dengan menggunakan metode *Pushover*.

Ada beberapa pilihan yang tersedia untuk memodelkan matriks dari massa, *damping*, dan kekakuan dari struktur yang ditinjau. *Damping* yang digunakan dalam struktur dapat dimodelkan dari *Rayleigh damping* model atau beberapa model yang digunakan untuk merepresentasikan variasi dari *critical damping* pada bagian-bagian yang berbeda dari sistem struktur.

53

3.11.1. Pemodelan Struktur

Sebelum dilakukan analisis, dibuat pemodelan struktur seperti yang telah ditentukan sebelumnya pada tahap perencanaan. Model struktur berupa rangka beton bertulang simetris 6 bentang 10 lantai dan 4 bentang 10 lantai dapat dilihat pada Gambar 3.18. berikut ini:



Gambar 3.18. Model struktur berupa rangka beton bertulang simetris 6 bentang 10 lantai dan 4 bentang 10 lantai

3.11.2. Input Hinge Properties

3.11.2.1. Pendefinisian Hinge Properties Balok

Data *hinge properties* di-*input*-kan pada penampang balok daerah tumpuan, yaitu di lokasi di mana sendi plastis diharapkan terjadi. *Hinge properties* ini dimasukkan hanya untuk Mz saja karena pada struktur balok diasumsikan yang menentukan adalah kegagalan lentur. Posisi sumbu lokal z dapat dilihat pada Gambar 3.19. berikut ini.



Gambar 3.19. Posisi sumbu lokal balok struktur pada Program RUAUMOKO 3D (Carr, 2001)

Untuk *input hinge properties* penampang balok dengan posisi dan jumlah tulangan tertentu diperlukan data-data berupa:

a) Yield Moment

Yield Moment didapat dari grafik bilenear yang telah disederhanakan dari grafik momen kurvatur yang merupakan *output* program ESDAP (Lidyawati dan Pono, 2003)

b) *Hinge Length* (Panjang Sendi Plastis)

Berdasarkan ATC 40 (1997) panjang sendi plastis untuk struktur balok sebesar 0,5 h. Oleh sebab itu pada penelitian ini, panjang sendi plastis untuk balok diambil sebesar sebesar 0,5 h.

c) Bi-linear Factor / Ramberg-Osgood r (RFz)

Untuk mengetahui hubungan antara gaya dan simpangan yang terjadi digunakan model *Bi-Linear Hysteresis Rules* seperti pada Gambar 3.20. berikut ini.



Gambar 3.20. Bi-Linear Hysteresis Rules

Faktor *bi-linear* (r) yang dipakai merupakan hasil dari analisis penampang yang dilakukan dengan bantuan program ESDAP (Lidyawati dan Pono, 2003). Untuk mencari grafik *bi-linear*, diperlukan data-data berupa hubungan antara *moment-curvature*, nilai *yield moment*, *yield curvature*, *ultimate moment*, dan *ultimate curvature*.

d) *Ultimate Ductility*

Dalam penelitian ini, untuk menghitung *ultimate ductility* digunakan perumusan *ultimate curvature / yield curvature* ($\mu_u = \emptyset_u / \emptyset_y$).

Berikut ini adalah contoh perhitungan *input hinge property* elemen balok pada program RUAUMOKO 3D berdasarkan hasil analisis yang didapatkan dari program ESDAP untuk balok B30 lantai 6 pada bangunan 6 lantai. Penampang balok dapat dilihat pada Gambar 3.21.



Gambar 3.21. Penampang balok B30 lantai 6

Data penampang balok :

$$\begin{split} & f_c{}^{'} = 30 \text{ MPa} \\ & E_c = 4700 \sqrt{f_c{}^{'}} = 25742960,2 \text{ kNm}^2 \\ & E_s = 2 \text{ x } 10^8 \text{ kNm}^2 \\ & I_{gross} = 1/12 \text{ x } 0,35 \text{ x } 0,7^3 = 0,0100041 \text{ m}^4 \\ & \text{Selimut beton} = 40 \text{ mm} \\ & \text{Tulangan lentur (} f_y = 400 \text{ MPa}) \\ & A_s \text{ atas} = 1538.355 \text{ mm}^2 \\ & A_s \text{ bawah} = 780.325 \text{ mm}^2 \\ & \text{Tulangan geser (} f_y = 240 \text{ MPa}) \\ & \text{digunakan rectangular hoops } \emptyset 12-58 \text{ mm} \\ & \text{Hasil analisis moment-curvature dari ESDAP : Positif:} \\ & \emptyset_y{}^+ = 0.0045746 \text{ rad/m}; \qquad \emptyset_u{}^+ = 0.1352612 \end{split}$$

$$Ø_{y}^{+} = 0.0045746 \text{ rad/m};$$
 $Ø_{u}^{+} = 0.1352612 \text{ rad/m}$
 $M_{y}^{+} = 388.93871 \text{ kNm};$ $M_{u}^{+} = 550.62 \text{ kNm}$
 $\text{Slope}_{1} = \frac{M_{y}}{Ø_{y}} = \frac{388.93871}{0.0045746} = 85021.35924$

$$Slope_{2} = \frac{M_{u} - M_{y}}{\emptyset_{u} - \emptyset_{y}} = \frac{550.62 - 388.93871}{0.1352612 - 0.0045746} = 1237.16808$$
$$r^{+} = \frac{Slope_{2}}{Slope_{1}} = \frac{1237.16808}{85021.3592} = 0.01455$$
$$\mu^{+} = \frac{\emptyset_{u}}{\emptyset_{y}} = \frac{0.1352612}{0.0045746} = 29.56787$$

Negatif:

$$\begin{split} & \emptyset_{y}^{-} = 0.0045629 \text{ rad/m}; \qquad \emptyset_{u}^{-} = 0.1334794 \text{ rad/m} \\ & M_{y}^{-} = 389.3191 \text{ kNm}; M_{u}^{-} = 549.75 \text{ kNm} \\ & \text{Slope}_{1} = \frac{M_{y}}{\emptyset_{y}} = \frac{389.3191}{0.0045629} = 85322.733 \\ & \text{Slope}_{2} = \frac{M_{u} - M_{y}}{\emptyset_{u} - \emptyset_{y}} = \frac{549.75 \cdot 389.3191}{0.1334794 \cdot 0.0045629} = 1244.456 \\ & \text{r}^{-} = \frac{\text{Slope}_{2}}{\text{Slope}_{1}} = \frac{1244.456}{85322.733} = 0.01459 \\ & \mu^{-} = \frac{\emptyset_{u}}{\emptyset_{y}} = \frac{0.1334794}{0.0045629} = 29.2532 \end{split}$$

$$RFz = (r^{+} + r^{-}) / 2 = (0.01455 + 0.01459) / 2 = 0.01457$$

3.11.2.2. Pendefinisian *Hinge Properties* Kolom

Terjadinya sendi plastis ditentukan oleh interaksi gaya aksial (N) dan momen (M) sumbu lokal y dan sumbu lokal z. Posisi sumbu lokal y dan sumbu lokal z pada kolom dapat dilihat pada Gambar 3.22. Dalam penelitian ini, setiap kolom pada bangunan yang ditinjau memiliki kapasitas momen sumbu lokal y yang sama dengan kapasitas momen sumbu lokal z. Hal ini disebabkan karena dimensi kolom berbentuk persegi dan tulangan kolom yang ada tersebar merata pada keempat sisinya.



Gambar 3.22. Posisi sumbu lokal elemen kolom struktur pada Program RUAUMOKO 3D (Carr, 2001)

Untuk *input hinge properties* penampang kolom dengan posisi dan jumlah tulangan tertentu diperlukan data-data berupa:

a) Yield Moment

Yield Moment didapat dari output program ESDAP (Lidyawati dan Pono, 2003). *Yield moment* diambil ketika kolom mengalami kondisi *balance*.

b) *Hinge Length* (Panjang Sendi Plastis)

Berdasarkan ATC 40 (1997) panjang sendi plastis untuk struktur kolom juga sebesar 0,5 h. Sehingga, panjang sendi plastis untuk balok diambil sebesar sebesar 0,5 h.

- c) Bi-linear Factor / Ramberg-Osgood r (RFz)
 Penjelasan mengenai bi-linear factor dapat dilihat pada pendefinisian hinge properties balok.
- d) Ultimate Ductility

Dalam penelitian ini, untuk menghitung *ultimate ductility* digunakan perumusan *ultimate curvature / yield curvature* ($\mu_u = \emptyset_u / \emptyset_y$). *Input ultimate ductility* pada kolom untuk arah y maupun arah z. *Ultimate ductility* arah y sama dengan arah z karena dimensi kolom berbentuk persegi dan tulangan kolom yang ada tersebar merata pada keempat sisinya.

Berikut ini adalah contoh perhitungan *input hinge property* elemen kolom pada program RUAUMOKO 3D berdasarkan hasil analisis yang didapatkan dari program ESDAP untuk kolom C13 lantai 5 pada bangunan 10 lantai potongan atas. Penampang kolom dapat dilihat pada Gambar 3.23.



Gambar 3.23. Penampang kolom C1 lantai 1 bangunan 10 lantai

Data penampang kolom :

$$\begin{split} & f_c \, '= 30 \text{ MPa} \\ & E_c = 4700 \sqrt{f_c} \, '= 25742960, 2 \text{ kNm}^2 \\ & E_s = 2 \text{ x } 10^8 \text{ kNm}^2 \\ & I_{gross} = 1/12 \text{ x } 0, 7 \text{ x } 0, 7^3 = 0, 020008 \text{ m}^4 \\ & \text{Selimut beton} = 40 \text{ mm} \\ & \text{Tulangan lentur } (f_y = 400 \text{ MPa}) \\ & A_s \text{ atas } = 5932.131178 \text{ mm}^2 \\ & A_s \text{ bawah } = 5932.131178 \text{ mm}^2 \\ & \text{Tulangan geser } (f_y = 400 \text{ MPa}) \\ & \text{Hasil analisis moment-curvature } \text{ dari ESDAP :} \\ & \emptyset_y = 0.0064294 \text{ rad/m}; \\ & M_u = 1348.7007 \text{ kNm}; \\ \end{split}$$

$$Slope_{1} = \frac{M_{y}}{\emptyset_{y}} = \frac{1348.7007}{0.0064294} = 209770.8495$$

$$Slope_{2} = \frac{M_{u} - M_{y}}{\emptyset_{u} - \emptyset_{y}} = \frac{1627.57 - 1348.7007}{0.2017161 - 0.0064294} = 1427.999449$$

$$r = \frac{Slope_{2}}{Slope_{1}} = \frac{1427.999449}{209770.8495} = 0.00681$$

$$\mu = \frac{\emptyset_{u}}{\emptyset_{y}} = \frac{0.2017161}{0.0064294} = 31.37402$$

$$RFz = r = 0.00681$$

3.11.2.3. Kondisi Pembebanan

Beban gempa yang digunakan rekaman gempa El Centro 18 Mei 1940 komponen *North-South*. Rekaman gempa tersebut dimodifikasi terhadap periode ulang 500 tahun dengan program RESMAT (Lukito, 1995), berdasarkan SNI 1726-02 (Badan Standardisasi Nasional, 2002). Target respons spektrum 500 tahun yang digunakan adalah target respons spektrum untuk wilayah 2 peta gempa Indonesia (SNI 1726-02) untuk jenis tanah lunak.

Respons spektrum dari Gempa El Centro 1940 *North-South*, baik dari rekaman gempa asli maupun dari rekaman gempa yang dimodifikasi untuk periode ulang 500 tahun (wilayah 2 peta gempa Indonesia), ditunjukkan pada Gambar 3.24.



Gambar 3.24. Respons Spektrum Gempa El Centro 18 Mei 1940 North-South yang telah dimodifikasi terhadap Periode Ulang 500 Tahun sesuai SNI 1726-02

Untuk rekaman percepatan gempa El-Centro 1940 *North-South* asli maupun yang telah dimodifikasi untuk periode ulang 500 tahun (wilayah 2 peta gempa Indonesia), dapat dilihat pada Gambar 3.25. dan Gambar 3.26.



Gambar 3.25. Rekaman Gempa El Centro 18 Mei 1940 North-South Asli



Gambar 3.26. Rekaman Gempa El Centro 18 Mei 1940 *North-South* yang telah dimodifikasi terhadap Periode Ulang 500 Tahun Sesuai SNI 1726-02

3.11.2.4. Kinerja Struktur

Program RUAUMOKO 3D dapat menampilkan hasil analisis berupa *damage index* (DI). Tingkat kerusakan yang terjadi dapat ditentukan dari nilai *damage index*. Standar tingkat kerusakan untuk nilai *damage index* digunakan standar ACMC yang sama dengan analisis statis *pushover non-linear*. Apabila nilai damage index kurang dari 0.4, maka struktur tersebut masih dapat diperbaiki. Untuk nilai *damage index* lebih dari satu, berarti daktilitas yang terjadi melebihi *ultimate ductility*. Oleh karena itu, dikatakan bahwa struktur telah mengalami kerusakan yang sangat besar pada saat nilai *damage index* lebih dari satu. Namun, pada RUAUMOKO 3D analisis akan terus berjalan walaupun nilai *damage index* melebihi 1. Jadi dapat dikatakan bahwa *input ultimate ductility* merupakan *post processing* dari program RUAUMOKO 3D dan tidak akan mempengaruhi analisis secara keseluruhan. Pada penelitian ini, nilai *damage index* yang digunakan adalah *damage index* yang dihitung dengan metode *ductility* dengan rumusan :

$$DI = \frac{\mu_{\rm m} - 1}{\mu_{\rm u} - 1} \tag{3.7}$$

dimana:

DI = damage index

- $\mu_{\rm m}$ = daktilitas yang terjadi
- μ_{u} = *ultimate ductility*

63