

Studi Perancangan Bangunan Tahan Gempa dan Tsunami di Kepulauan Mentawai, Sumatera Barat

Cavell Aulia Demitha Putri dan Faimun

Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

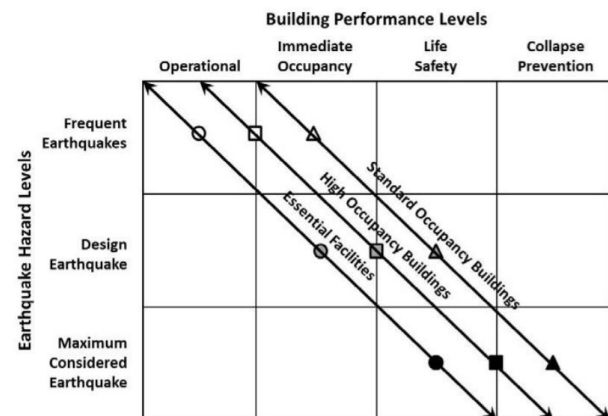
e-mail: faimun@ce.its.ac.id

Abstrak—Tsunami adalah bencana alam berupa gelombang air dengan periode panjang, yang salah satu penyebabnya ialah gempa bumi tektonik. Sebagai negara yang berada di antara pertemuan tiga lempeng tektonik; Indo – Australia, Eurasia, dan Pasifik, hal tersebut menyebabkan kawasan Indonesia rentan terjadi gempa bumi tektonik hingga tsunami. Tsunami destruktif dapat memberikan berbagai dampak terhadap apapun yang dilaluinya; baik infrastruktur maupun jiwa penduduk. Sehingga, dibutuhkan suatu bangunan yang mampu menahan gempa bumi hingga tsunami bagi penduduk Indonesia untuk meminimalisir dampak yang tersebut. Bangunan vertikal yang didesain harus memenuhi standar dan kriteria bangunan tahan tsunami. Dalam SNI 1727 – 2020 dan FEMA P – 646, dijelaskan bahwa level kinerja minimal suatu bangunan yang layak digunakan sebagai bangunan tahan tsunami ialah pada level *Immediate Occupancy*. Maka, dalam perencanaan penulisan ini akan digunakan metode *Performance Based Design (PBD)* yang ditunjang dengan analisa non – linier berupa *Pushover Analysis*, guna mengetahui level kinerja suatu bangunan. Desain bangunan vertikal tahan gempa dan tsunami pada penulisan ini direncanakan di Kepulauan Mentawai, Sumatera Barat. Konstruksi yang digunakan ialah baja bersistem bracing eksentris atau *Eccentrically Braced Frames (EBF)*, dengan sistem sambungan berupa *Reduced Beam Section (RBS)*. Dari hasil analisis dan perhitungan, didapatkan tebal pelat lantai yang digunakan adalah 10 cm serta 9 cm. Untuk profil yang digunakan, yaitu dimensi bracing WF 400 x 400 x 25 x 30, dimensi balok induk WF 800 x 300 x 14 x 26 dan WF 800 x 300 x 14 x 22, dimensi balok link WF 700 x 300 x 15 x 28, dimensi balok anak WF 350 x 250 x 9 x 14, dimensi kolom WF 500 x 500 x 70 80, WF 400 x 400 x 30 x 50 dan WF 400 x 400 x 25 x 30. Spun pile berdiameter 80 cm digunakan sebagai pondasi yang dipancang pada kedalaman 18 m serta 20 m.

Kata Kunci—*Eccentrically Braced Frames, Reduced Beam Section, Tsunami.*

I. PENDAHULUAN

TSUNAMI adalah gelombang air berperiode panjang (kurun waktu menit hingga jam) yang terjadi disebabkan oleh beberapa hal; erupsi vulkanik, longsor ataupun gempa bumi tektonik di bawah laut [1]. Gelombang air tsunami berpotensi mengakibatkan bencana alam ketika mulai menyentuh daratan. Dikarenakan, saat gelombang air laut beralih dari perairan dalam ke perairan dangkal, kecepatan gelombang air tsunami menurun, namun ketinggian gelombang air tsunami bertambah (FEMA P-646). Sehingga, kerusakan dari bencana alam yang disebabkan oleh tsunami, diakibatkan oleh beban gelombang air terhadap elemen yang dilaluinya. Kerusakan tersebut dapat berupa infrastruktur atau bahkan korban jiwa [2]. Khususnya di Indonesia, tingginya frekuensi kejadian tsunami akibat gempa bumi, disebabkan oleh letaknya yang berada pada pertemuan tiga lempeng; Indo Australia, Eurasia, dan Pasifik [3].



Gambar 1. Kinerja seismik bangunan.

Gedung yang tahan atas tsunami harus didesain sesuai dengan syarat dan memenuhi faktor keamanan akibat beban yang diberikan oleh gelombang air tsunami. Beberapa beban tersebut ialah berupa beban impak puing, hidrostatik, hidrodinamis, dan beban angkat. Pada ASCE 7-16 dijelaskan bahwa kriteria kinerja bangunan struktural tahan tsunami harus memenuhi level *Immediate Occupancy*. Dalam memodelkan struktur guna memenuhi level tersebut, dapat digunakan metode *Pushover Analysis*.

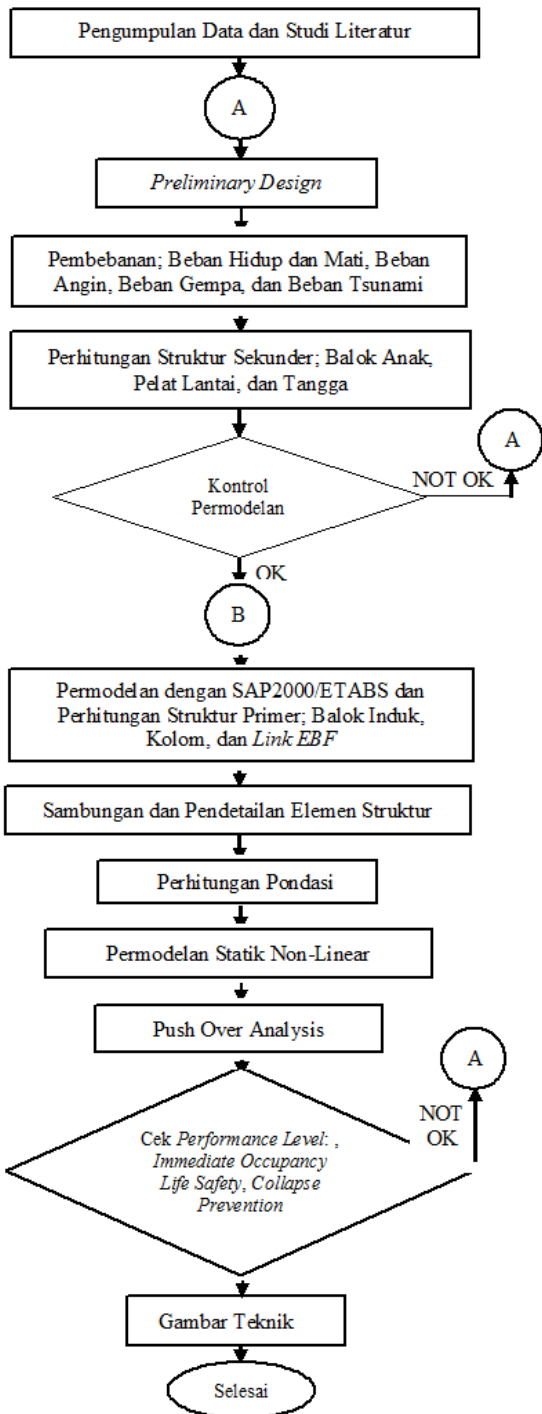
Dalam penulisan ini akan direncanakan desain bangunan gedung vertikal dengan sistem *Eccentrically Braced Frames (EBF)* dan sambungan *Reduced Beam Section (RBS)* yang memenuhi kriteria kinerja serta pembebanan tsunami.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. *Eccentrically Braced Frames (EBF)*

Dalam penulisan ini, akan direncanakan bangunan dengan sistem *eccentrically braced frames (EBF)*. Sistem rangka EBF ialah sistem struktur penahan beban lateral yang terdiri dari balok, kolom, dan pengaku. Pengaku pada EBF tidak langsung bertemu dengan perpotongan balok dan kolom. Melainkan, pengaku bertemu pada balok dengan jarak tertentu, dan membentuk elemen *link beam*.

Sistem EBF merupakan pengembangan kedua sistem penahan beban lateral; *Moment Resisting Frame (MRF)* serta *Concentrically Braced Frames (CBF)*. Sistem MRF memiliki sifat daktilitas serta kapasitas disipasi energi yang tinggi. Sistem ini mampu menyerap energi pada sendi plastis yang terdapat pada balok, ketika struktur sudah memenuhi nilai simpangan antar lantai yang dibutuhkan akibat beban lateral. Di lain sisi, sistem CBF ialah sistem struktur yang berpengaku sehingga memiliki kekakuan elastis yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan sistem MRF. Dengan demikian, atas gabungan kedua sistem tersebut, EBF ber



Gambar 2. Diagram alir perencanaan tugas akhir.

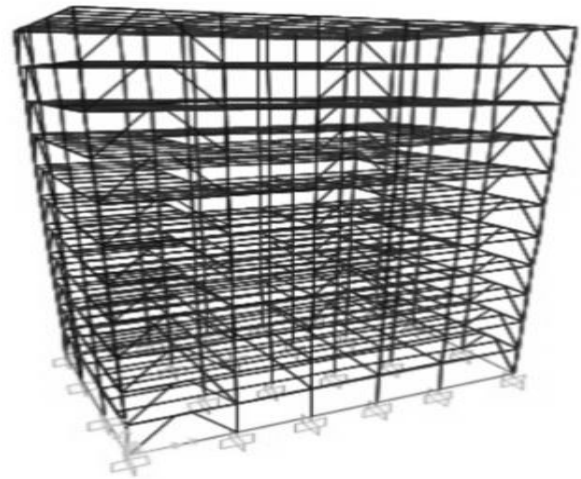
karakteristik sebagai sistem struktur yang daktail, memiliki kapasitas disipasi energi, serta kekakuan elastis yang baik [4].

B. Konsep Elemen Link

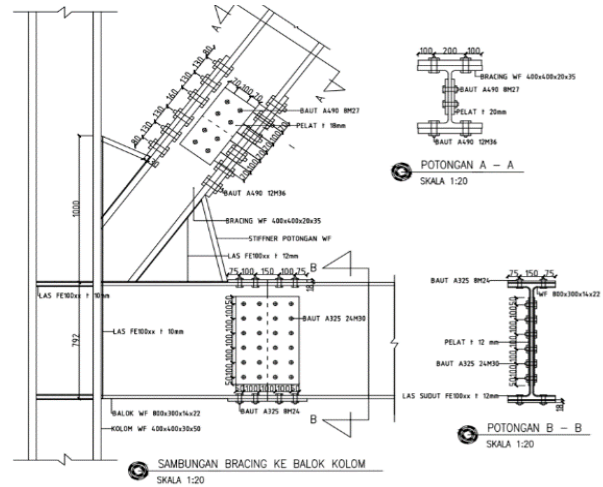
Dalam mendesain *link*, terdapat beberapa hal yang harus dipertimbangkan agar mendapatkan kekuatan struktur sistem EBF yang baik, yaitu: (1) Variabel utama dalam mendesain *link* pada sistem EBF ialah konfigurasi pengaku, panjang *link*, serta profil *link* yang digunakan. (2) Elemen struktur lain di luar *link* seperti balok, kolom, dan sambungan harus lebih kuat daripada *link* [5]. (3) Pengaku lateral dan stiffner dengan maksud menunjang daktilitas [5].

C. Performance Based Design (PBD)

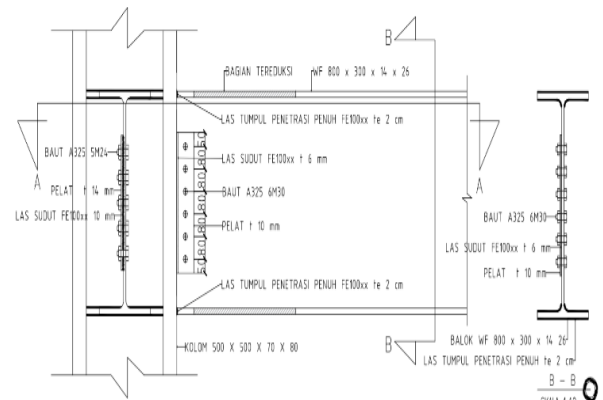
Performance based design (PBD) adalah suatu metode



Gambar 3. Permodelan gedung pada SAP2000.



Gambar 4. Sambungan bracing dan balok non-RBS.



Gambar 5. Sambungan balok RBS ke sumbu mayor kolom.

yang diterapkan dalam penetapan kinerja struktur rencana atas beban (dapat berupa beban seismik). Dengan limitasi kinerja yang ingin didesain, metode ini dapat memberikan informasi terkait level kinerja atas gaya seismik desain yang diterima oleh struktur dalam mengatasi keadaan inelastis yang berada dibawah beban siklik [6]. Level kinerja berdasarkan Federal Emergency Management Agency P-646 (FEMA P-646) ialah seperti pada Gambar 1.

D. Reduced Beam Section

Terjadinya gempa-tsunami pada Kobe, 1995 menyebabkan banyaknya kerusakan struktur. Kejadian tersebut menunjukkan salah satu penyebab kegagalan struktur terdapat pada sambungan antara balok dan kolom pada

Tabel 4.
Parameter respons spektrum gempa

Ss (g)	1,5
S1 (g)	0,6
Fa	0,9
Fv	2,4
SMs (g)	1,35
SM1 (g)	1,44
SDs (g)	0,9
SD1 (g)	0,96
T ₀ (s)	0,2
Ts (s)	1,0677

Tabel 5.
Partisipasi massa struktur

StepNum	Period	Sum UX	Sum UY
5	0.299	0.883	0.888
6	0.262	0.883	0.888
7	0.211	0.883	0.935
8	0.169	0.928	0.935
9	0.151	0.928	0.960

Tabel 6.
Simpangan antar lantai gempa X

Elevasi (m)	U1 (cm)	U2 (cm)	Drift U1(cm)	Drift U2(cm)	Drift ijin	Kontrol
4,3	0.328	0.148	0.87	0.397	4,3	OK
8,6	0.804	0.349	1.27	0.535	4,3	OK
12,9	1.314	0.569	1.36	0.585	4,3	OK
17,2	1.831	0.797	1.37	0.607	4,3	OK
21,5	2.346	1.018	1.37	0.590	4,3	OK
25,8	2.922	1.295	1.53	0.736	4,3	OK
30,1	3.490	1.564	1.51	0.716	4,3	OK
34,4	4.009	1.815	1.38	0.669	4,3	OK
38,7	4.478	2.062	1.25	0.659	4,3	OK
43	4.859	2.271	1.01	0.556	4,3	OK
47,3	5.148	2.428	0.77	0.419	4,3	OK

konstruksi baja.

Dengan demikian, banyak improvisasi metode yang ditemukan dalam rangka memperbaiki dan menghindari terjadinya kegagalan tersebut.

Salah satunya adalah dengan membatasi tegangan yang terjadi pada sambungan balok dan kolom. Dengan demikian, kegagalan pada sambungan balok dan kolom akan terhindari. Metode ini dilakukan dengan mereduksi penampang balok, yang disebut *reduced beam section* [8].

III. METODOLOGI

Alur perencanaan tugas akhir diperlihatkan seperti pada Gambar 2.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Data Perencanaan

Nama bangunan : Gedung Tahan Gempa dan Tsunami
 Lokasi bangunan : Kepulauan Mentawai, Sumatera
 Jumlah lantai : 12 lantai
 Level : +47,3 m
 Kelas situs : Tanah lunak (SE)
 Material struktur : Baja
 Sistem struktur : Sistem Rangka Bracing Eksentris
 Tinggi : +8,6 m
 Profil : *Wide Flange* (WF)
 Mutu baja : BJ 41

Tabel 1.
Simpangan antar lantai gempa Y

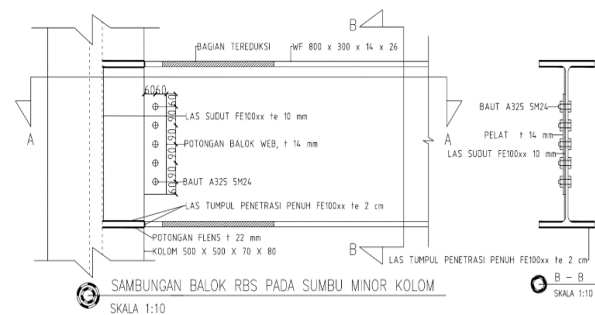
Elevasi (m)	U1 (cm)	U2 (cm)	Drift U1(cm)	Drift U2(cm)	Drift ijin	Kontrol
4,3	0.102	0.503	0.274	1.342	4,3	OK
8,6	0.253	1.181	0.403	1.809	4,3	OK
12,9	0.414	1.923	0.429	1.978	4,3	OK
17,2	0.573	2.692	0.425	2.050	4,3	OK
21,5	0.731	3.439	0.421	1.995	4,3	OK
25,8	0.914	4.372	0.486	2.487	4,3	OK
30,1	1.093	5.279	0.477	2.420	4,3	OK
34,4	1.253	6.126	0.428	2.259	4,3	OK
38,7	1.400	6.962	0.391	2.227	4,3	OK
43	1.513	7.66	0.303	1.879	4,3	OK
47,3	1.591	8.197	0.208	1.415	4,3	OK

Tabel 2.
Presentase distribusi gaya geser dasar

	UX (kg)	%	UY (kg)	%
SRBE	389.223	53	480.597	65
SRPM	345.693	47	256.096	35
Total	734.916	100	736.693	100

Tabel 3.
Penulangan pile cap

Type Pile Cap	Dimensi (mm)	Tebal (mm)	Jumlah Tiang (buah)	Tulangan
Type 1	4800 x 4800	1500	480.597	D25 - 100
Type 2	4800 x 3200	1500	736.693	D25 - 100



Gambar 6. Sambungan balok rbs ke sumbu minor kolom.

B. Kontrol Permodelan

Perencanaan gedung di modelkan pada SAP2000 seperti pada Gambar 3. Berdasarkan kalkulasi, didapatkan parameter respons spektrum gempa untuk dianalisis seperti Tabel 1.

1) Kontrol Partisipasi Massa

Nilai partisipasi massa harus memenuhi seminimalnya ialah 90% [9]. Hasil partisipasi massa struktur berdasarkan analisis pada program bantu ialah seperti pada Tabel 2.

2) Kontrol Periode Getar Struktur

Nilai T_a ialah sebesar 1,312 s dan Nilai T ialah sebesar 1,837s

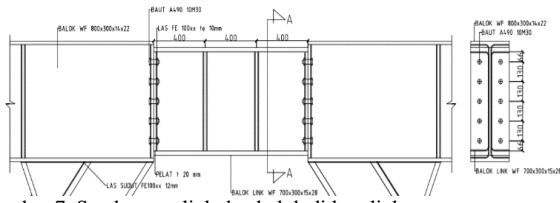
$$T_a = C_t h_n^x$$

$$T = C_u T_a$$

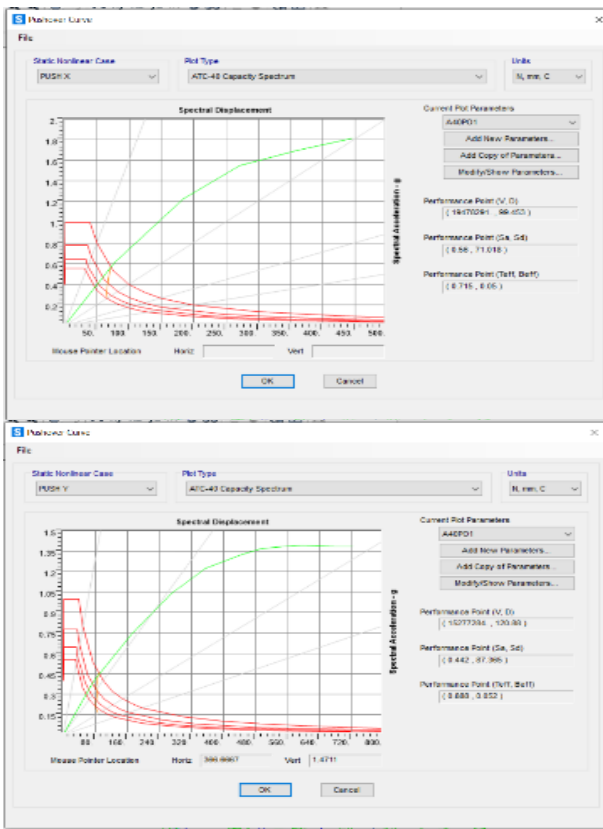
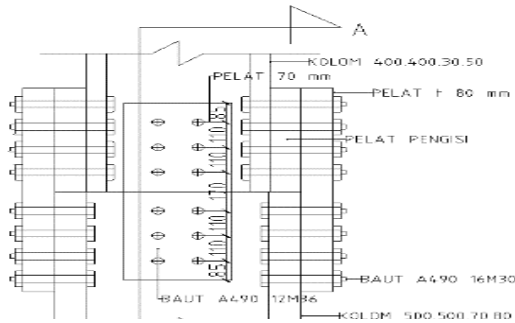
Berdasarkan permodelan, didapatkan nilai T_c = 1,031. Maka, periode yang digunakan untuk analisa gaya geser dasar dinamik ialah T_a = 1,312 s.

3) Kontrol Gaya Geser Dasar

Nilai gaya geser dasar seismik berdasarkan analisis ragam (V_t) harus memenuhi 100% nilai respon statik, V [9]. Jika nilai V_t lebih kecil daripada nilai V, maka gaya tersebut harus dikalikan sebesar V/V_t.



Gambar 7. Sambungan link dan balok di luar link.



Gambar 10. Hasil analisa pushover analysis.

$$V_{dinamis} \geq 100\% V_{statis}$$

$$C_s = \frac{SD_s}{R} \cdot \frac{I_e}{I_e}$$

$$C_s = \frac{SD_1}{T \left(\frac{R}{I_e} \right)}$$

$$C_s = 0,044 SD_s$$

Maka, didapatkan hasil gaya geser dasar yang gayanya telah diskalakan sebesar V/V_t sebagai berikut:

Arah X

$$V_t \text{ dinamik} \geq 100\% V \text{ static}$$

$$734.854,94 \text{ kg} \geq 734.108,34 \text{ kg (OK)}$$

Arah Y

$$V_t \text{ dinamik} \geq 100\% V \text{ static}$$

$$734.858,27 \text{ kg} \geq 734.108,34 \text{ kg (OK)}$$

4) Kontrol Simpanan Antar Lantai

$$(\delta_{e2} - \delta_{e1}) \times \left(\frac{Cd}{I} \right)$$

$$\Delta a = 0,01 \cdot h_{sx}$$

$$\Delta i < \Delta a$$

Berdasarkan hasil analisis permodelan, didapatkan nilai simpangan antar lantai seperti pada Tabel 3 dan Tabel 4.

5) Kontrol Sistem Ganda

Gaya gempa yang terjadi pada struktur dengan system ganda, harus dipikul oleh SRPM minimal sebesar 25% [9]. Sehingga berdasarkan analisis didapatkan hasil seperti pada Tabel 5.

C. Analisis Struktur Primer

Contoh perhitungan terkait gaya dalam struktur primer elemen ialah seperti berikut:

1) Bracing

Profil bracing = WF 400 x 400 x 20 x 35

Kontrol Bracing Tekan:

$$\begin{aligned} \phi P_n &= 0,9 \times 1,1 R_y F_{cr} A_g \\ &= 0,9 \times 1,1 \times 1,5 \times 2184,88 \times 370,7 \\ &= 1.300.341,33 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$P_u = 217.838,24 \text{ kg}$$

$$\phi P_n > P_u \text{ (OK!)}$$

Kontrol Bracing Tarik:

$$\begin{aligned} \phi P_n &= R_y F_y A_g \\ &= 0,9 \times 1,5 \times 2500 \times 370,7 \\ &= 1.271.362,5 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$P_u = 217.838,24 \text{ kg}$$

$$\phi P_n > P_u \text{ (OK!)}$$

2) Link

Profil link = WF 700x 300 x 15 x 28

Cek Pengaruh Aksial:

$$\begin{aligned} \phi P_y &= 0,9 \times A_g \times F_y \\ &= 0,9 \times 273,6 \times 2500 \\ &= 615.600 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$P_u = 4.933 \text{ kg}$$

$$0,15 \times \phi P_y = 92.340 > P_u \rightarrow \text{tidak hitung pengaruh aksial}$$

Kontrol Kuat Geser:

$$\begin{aligned} V_p &= 0,6 f_y (d - 2t_f) t_w \\ &= 0,6 \times 2500 \times (70,8 - 2 \times 28) \times 1,5 \\ &= 146.700 \text{ kg} \end{aligned}$$

Karena $V_p < 2 M_{px} / e$, maka:

$$V_n = V_p = 146.700$$

$$\phi V_n = 0,9 \times 146.700 = 132.030 \text{ kg} \geq V_u = 64.167 \text{ kg (OK!)}$$

Kontrol Sudut Rotasi Link

Karena nilai $e < 1,6 (M_p/V_p)$, maka sudut rotasi maksimal link ialah 0,08 radian.

$$\gamma = 0,00014 \text{ rad} < \gamma_{izin} = 0,08 \text{ rad}$$

(OK!)

Jarak Pengaku Link

Digunakan interpolasi untuk mendapatkan jarak pengaku maksimum untuk $\gamma = 0,00014$ rad, yaitu sebagai berikut:

$$S = \frac{0,00014-0,08}{0,02-0,08} (638,4 - 308,4) + 308,4$$

$$= 747,6 \text{ mm}$$

Maka, digunakan jarak (S_{pakai}) antar pengaku 40 mm.

3) Balok

Profil balok = WF 800 x 300 x 14 x 26

Kontrol Penampang Tekuk Lokal:

$$\phi M_n \geq M_u = 0,9 \times 19.987.500 \text{ kgcm} \geq 6.702.039 \text{ kgcm}$$

$$= 18.988.750 \text{ kgcm} \geq 6.702.039 \text{ kgcm} \text{ (OK!)}$$

Kontrol Penampang Tekuk Lateral:

$L_p < L_b < L_r \rightarrow$ Bentang Menengah

$$\phi M_n \geq M_u = 0,9 \times 15.436.821 \text{ kgcm} \geq 6.702.039 \text{ kgcm}$$

$$= 15.436.821 \text{ kgcm} \geq 6.702.039 \text{ kgcm} \text{ (OK!)}$$

Kontrol Kemampuan Nominal Geser:

$$V_n = 0,6 \times F_y \times A_w \times C_v$$

$$= 0,6 \times 2500 \times (74,8 \times 1,4) \times 1$$

$$= 157.080 \text{ kg}$$

$$\phi V_n \geq V_u = 0,9 \times 157.080 \text{ kgcm} \geq 23.713 \text{ kgcm}$$

$$= 141.372 \text{ kgcm} \geq 23.713 \text{ kgcm} \text{ (OK!)}$$

Kontrol Interaksi Geser Lentur:

$$\frac{M_u}{\phi M_n} + 0,625 \left(\frac{V_u}{\phi V_n} \right) \leq 1,375$$

$$\frac{6.702.039}{13.893.139} + 0,625 \left(\frac{23.713}{141.372} \right) \leq 1,375$$

$$0,587 \leq 1,375 \text{ (OK!)}$$

4) Kolom

Profil kolom = H 500 x 500 x 70 x 80

Kontrol Kuat Tekan Kolom:

$$P_n = F_{cr} A_g = 2.717.407 \text{ kg}$$

$$\phi P_n = 0,9 \times 2.717.407 = 2.445.666 \text{ kg} > P_u = 314.218 \text{ kg}$$

$$\text{(OK!)}$$

Kontrol Penampang Tekuk Lateral:

$L_b < L_p \rightarrow$ Bentang Pendek

$$\phi M_{nx} = 0,9 \times Z_x F_y$$

$$= 0,9 \times 64.500.000 \text{ kgcm}$$

$$= 58.050.000 \text{ kgcm}$$

$$M_{ux} = 6.814.347 \text{ kgm}$$

$$\phi M_{nx} > M_{ux} \text{ (OK!)}$$

$$\phi M_{ny} = 0,9 \times Z_y F_y$$

$$= 0,9 \times 28.500.000 \text{ kgcm}$$

$$= 25.650.000 \text{ kgcm}$$

$$M_{uy} = 3.591.434 \text{ kgm}$$

$$\phi M_{ny} > M_{uy} \text{ (OK!)}$$

Kontrol Kemampuan Nominal Geser:

$$V_n = 0,6 \times F_y \times A_w \times C_v$$

$$= 0,6 \times 2500 \times (45,2 \times 7) \times 1$$

$$= 474.600 \text{ kg}$$

$$\phi V_n \geq V_u = 0,9 \times 474.600 \text{ kgcm} \geq 23.805 \text{ kgcm}$$

$$= 427.140 \text{ kgcm} \geq 23.805 \text{ kgcm} \text{ (OK!)}$$

Kekuatan Lentur Orde Kedua:

$$\beta_1 = 1$$

$$\beta_2 = 1,04$$

$$M_{rx} = 71.289 \text{ kgm}$$

$$M_{ry} = 52.205 \text{ kgm}$$

$$P_{rx} = 518.892 \text{ kg}$$

$$P_{ry} = 622.043 \text{ kg}$$

Kontrol Interaksi Geser Lentur:

$$\frac{P_r}{P_c} = \frac{622.043}{2.445.666} = 0,25 > 0,2$$

Sehingga, untuk $P_r/P_c > 0,2$ persamaan interaksi yang digunakan adalah:

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) < 1$$

$$\frac{622.043}{2.445.666} + \frac{8}{9} \left(\frac{71.289}{580.500} + \frac{52.205}{265.500} \right) < 1$$

$$0,544 < 1 \text{ (OK!)}$$

D. Perencanaan Sambungan

Perencanaan sambungan menggunakan baut mutu tinggi A325 dan A490. Dalam perhitungannya, desain sambungan yang tahan akan gempa direncanakan untuk mampu menahan seluruh kapasitas profil yang disambungkan [7].

1) Sambungan Bracing

Dipasang baut tipe friksi M27 dengan mutu A490 pada badan bracing dengan tebal pelat 20 mm.

$$\mu = 0,3 \text{ (permukaan bersih)}$$

$$D_u = 1,13$$

$$H_f = 1 \text{ (factor pengisi)}$$

$$T_b = 334 \text{ kN (untuk M27, J3.1M)}$$

$$N_s = 2 \text{ (jumlah bidang geser)}$$

$$\phi = 1 \text{ (lubang standard)}$$

$$\phi R_n = \phi \times \mu \times D_u \times h_f \times T_b \times n_s$$

$$= 1 \times 0,3 \times 1,13 \times 1 \times 1 \times 334 \times 2$$

$$= 226,452 \text{ kN} = 22.872 \text{ kg}$$

Jumlah baut minimum yang dipasang ialah sebagai berikut

$$P_u = 179.000 \text{ (} P_u \text{ badan)}$$

$$\phi R_n = 22.872 \text{ kg}$$

$$n = P_u / \phi R_n$$

$$= 7,83$$

Maka digunakan baut 8M27 pada badan bracing. Kontrol Jarak Baut. Dipasang baut tipe friksi M36 dengan mutu A490 pada sayap bracing dengan tebal pelat 30 mm.

$$\phi R_n = \phi \times \mu \times D_u \times h_f \times T_b \times n_s$$

$$= 1 \times 0,3 \times 1,13 \times 1 \times 1 \times 595 \times 2$$

$$= 403,41 \text{ kN} = 40.744,4 \text{ kg}$$

Jumlah baut minimum yang dipasang ialah sebagai berikut

$$P_u = 712.250 \text{ (} P_u \text{ sayap)}$$

$$\phi R_n = 40.744 \text{ kg}$$

$$n = P_u / \phi R_n$$

$$= 17,2$$

Maka digunakan baut 24M36 pada sayap bracing dengan masing – masing sayap dipasang sebanyak 12 buah baut. Perhitungan Kontrol Kuat Pelat. Diambil contoh perhitungan pada pelat sayap, dengan tebal pelat

Putus bidang geser

$$\phi R_n = 0,6 f_u \times A_{nv} = 0,6 \times 4100 \times 192,6 = 192,6 \text{ kg}$$

Putus bidang Tarik

$$\phi R_n = 0,6 f_u \times A_{nt} = 0,6 \times 4100 \times 18,6 = 76.260 \text{ kg}$$

Putus bidang geser > Putus bidang Tarik, sehingga:

$$R_n = 0,6 F_u A_{nv} + U_{bs} F_y A_{gt}$$

$$= 0,6 \times 4100 \times 192,6 + 1 \times 2500 \times 24$$

$$= 531.396 \text{ kg}$$

Karena terdapat 2 pelat, maka

$$\phi = 0,75 \text{ (DFBK)}$$

$$\phi R_n = 0,75 \times 531.396 \times 2 = 797.094 \text{ kg}$$

$$P_u = 712.250 \text{ kg}$$

$$\phi R_n > P_u \text{ (OK!)}$$

2) *Sambungan Balok Non - RBS*

Dipasang baut mutu A325 M30 tipe friksi pada badan balok, dengan tebal pelat 12 mm (kanan dan kiri).

$$\phi R_n = 22.323,8 \text{ kg}$$

Jumlah baut minimum pada badan

$$n = \sqrt{\frac{6M_u}{\mu R_u}} = \sqrt{\frac{(6 \times 16.348,8)}{0,1 \times 21.430,9}} = 6,76 \text{ buah}$$

Sehingga digunakan baut 12M30 dalam 2 baris. Dipasang baut mutu A325 M24 tipe friksi pada sayap balok, dengan tebal pelat 28 mm.

$$\phi R_n = 7.086,41 \text{ kg}$$

Jumlah baut minimum pada sayap

$$T_u \text{ sayap} = 55.966 \text{ kg}$$

$$n = \frac{T_u \text{ sayap}}{\phi R_n} = \frac{55.966 \text{ kg}}{7.086,41 \text{ kg}} = 7,89$$

Maka, digunakan baut 8M24.

Sehingga, sambungan bracing serta balok non – RBS ialah seperti pada Gambar 4.

3) *Sambungan Balok RBS ke Sumbu Mayor Kolom*

Direncanakan baut tipe tumpu mutu A325 M30 dengan tebal pelat penyambung 10 mm.

Kuat Tumpu Baut:

$$R_n = 1,2 \text{ lc tp } F_u \leq 2,4 \text{ d t } F_u \\ = 1,2 \times 34,25 \times 10 \times 4100 \leq 2,4 \times 30 \times 10 \times 4100 \\ = 16.851 \text{ kg} \leq 29.520 \text{ kg}$$

$$\phi = 0,75 \text{ (DFBK)}$$

$$\phi R_n = 0,75 \times 16.851 \text{ kg} \\ = 12.638 \text{ kg}$$

Jumlah Minimum Baut

$$V_u \text{ kapasitas balok RBS} = 65.590,2 \text{ kg}$$

$$n = \frac{V_u}{\phi R_n} \\ = 5,19$$

Sehingga, digunakan baut A325 6M30.

Ilustrasi terkait sambungan balok RBS ke sumbu mayor kolom seperti pada Gambar 5.

4) *Sambungan Balok RBS ke Sumbu Minor Kolom*

Direncanakan baut tipe tumpu mutu A325 M24 dengan tebal pelat penyambung 14 mm.

Kuat Tumpu Baut:

$$R_n = 1,2 \text{ lc tp } F_u \leq 2,4 \text{ d t } F_u \\ = 1,2 \times 47,25 \times 14 \times 4100 \leq 2,4 \times 24 \times 14 \times 4100 \\ = 32.545 \text{ kg} \leq 33.062 \text{ kg}$$

$$\phi = 0,75 \text{ (DFBK)}$$

$$\phi R_n = 0,75 \times 32.545 \text{ kg} \\ = 24.409 \text{ kg}$$

Jumlah Minimum Baut

$$V_u \text{ kapasitas balok RBS} = 65.590,2 \text{ kg}$$

$$n = \frac{V_u}{\phi R_n} = 4,23$$

Sehingga, digunakan baut A325 5M24. Ilustrasi sambungan balok RBS ke sumbu mayor kolom seperti pada Gambar 6.

5) *Sambungan Link dan Balok di Luar Link*

Digunakan baut tipe tumpu mutu A490 M30 dengan tebal pelat 20 mm.

$$V_u = 242.055 \text{ kg}$$

Kuat Tumpu Baut:

$$R_n = 1,2 \text{ lc tp } F_u \leq 2,4 \text{ d t } F_u \\ = 1,2 \times 78,25 \times 20 \times 4100 \leq 2,4 \times 30 \times 20 \times 4100 \\ = 76.998 \text{ kg} \leq 61.992 \text{ kg}$$

$$\phi R_n = 0,75 \times 61.992 \text{ kg} \\ = 46.494 \text{ kg}$$

Jumlah Baut Minimum

$$P_u = 242.055 \text{ kg}$$

$$\phi R_n = 46.494 \text{ kg}$$

$$n = \frac{P_u}{\phi R_n} = \frac{242.055}{46.494} = 7,8$$

Sehingga, digunakan baut A490 10M30.

Kontrol Momen

$$\phi = 0,75$$

$$A_{bn} = 0,75 A_b = 0,75 \times (0,25 \times \pi \times 3^2) = 5,3 \text{ cm}^2$$

$$T_d \text{ ulir} = \phi F_{nt} A_{bn}$$

$$= 0,75 \times 10.350 \times 5,3 = 41.152,4 \text{ kg}$$

$$M_u = V_u \times t \text{ pelat} = 242.055 \times 2 = 48.411 \text{ kgcm}$$

Mencari garis netral (dengan asumsi awal titik putar momen berada di baut paling bawah)

$$F_y \text{ a b} = \frac{\sum T}{\sum T}$$

$$a = \frac{b \times f_y}{\sum T}$$

$$= \frac{\sum T}{b \times f_y}, \text{ b adalah bf}$$

$$= \frac{10 \times 41.152,4}{40 \times 2500} \text{ (terdapat 10 baut)}$$

$$= 5,4 \text{ cm}$$

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa asumsi awal jika garis netral berada di bawah baut terbawah ialah benar.

$$\phi M_n = \frac{0,9 f_y x a^2 x b}{2} + \sum T d =$$

$$\frac{0,9 \times 2500 \times 6,0014^2 \times 40}{2} + (1 \times 41.152,4) \times ((6,6 - 6,0014) + (19,6 - 6,0014) + (32,6 - 6,0014) + (45,6 - 6,0014) + (58,6 - 6,0014))$$

$$\phi M_n = 6.594.941 \text{ kgcm} > M_u = 484.110 \text{ kgcm (OK!)}$$

Ilustrasi terkait sambungan balok RBS ke sumbu mayor kolom seperti pada Gambar 7.

6) *Sambungan Kolom*

Sambungan antar kolom menggunakan baut A490 M30 dan pelat tebal 80 mm pada sayap, serta M36 dan tebal pelat 70 mm pada badan. Dengan perhitungan penggunaan baut friksi yang sama, maka didapatkan ilustrasi sambungan kolom H 500 x 500 x 70 x 80 dan H 400 x 400 x 30 x 50 seperti pada Gambar 8.

7) *Sambungan Base Plate*

$$B = 1100 \text{ mm} = 110 \text{ cm}$$

$$H = 1100 \text{ mm} = 110 \text{ cm}$$

$$t_p = 50 \text{ mm} = 5 \text{ cm}$$

Direncanakan baut tipe tumpu A490 M36.

$$R_n = 1,2 \text{ lc tp } F_u \leq 2,4 \text{ d t } F_u \\ = 1,2 \times 4,25 \times 50 \times 4100 \leq 2,4 \times 36 \times 50 \times 4100 \\ = 101.475 \text{ kg} \leq 177.120 \text{ kg}$$

$$\phi = 0,75 \text{ (DFBK)}$$

$$\phi R_n = 0,75 \times 101.475 \text{ kg} = 76.106 \text{ kg}$$

Jumlah Baut

$$P_u = P_u \text{ SAP2000} + V_u \text{ kapasitas kolom} \\ = 1.393.499,57$$

$$n = \frac{P_u}{\phi R_n} = \frac{1.393.499,57}{76.106} = 31,53$$

Digunakan angkur 32M36 yang disusun 2 baris pada keempat sisi base plate dengan panjang penanaman 1800 mm. Ilustrasi terkait sambungan baseplate ialah seperti pada Gambar 9.

E. Perencanaan Pondasi

1) Perencanaan Spun Pile

Pondasi dalam yang direncanakan ialah berupa spun pile dengan diameter 80 cm yang terdiri dari dua tipe pilecap;

Tipe 1 = Jumlah pile 9, dipancang pada kedalaman 20 m

Tipe 2 = Jumlah pile 6, dipancang pada kedalaman 18 m

Perhitungan daya dukung tanah menggunakan metode Terzaghi Bazaraa, dengan mengkalikannya dengan resistance factor sebesar 0,3 untuk SPT method.

2) Perencanaan Pile Cap

Perencanaan penulangan pilecap berdasarkan momen yang terjadi di sekeliling kolom yang dimodelkan pada SAP2000. Berdasarkan analisis dan kalkulasi, didapatkan hasil perencanaan pile cap seperti pada Tabel 6.

3) Perencanaan Sloof

Berdasarkan perhitungan didapatkan profil sloof sebagai berikut:

Dimensi sloof (mm) = 400 x 600

Tulangan longitudinal = 8D22 mm

Tulangan transversal = D10 – 250 mm

F. Pushover Analysis

Persyaratan kinerja struktur bangunan yang mampu menahan tsunami ialah pada level *Immediate Occupancy*. Dengan menggunakan analisa dengan *pushover*, kinerja struktur bangunan dapat dianalisa.

Pushover dilakukan dengan memodelkan struktur secara non-linear, dan mendefinisikan *hinge* pada elemen struktur. Hasil analisa menunjukkan bahwa struktur masih dalam keadaan *immediate occupancy*, berdasarkan batas *displacement* dengan referensi ATC (Gambar 10) [10].

Batas displacement IO = 0,01 H

= 0,01 x 47300

= 473 mm

Target displacement X = 99,4 mm < Batas (OK)

Target displacement Y = 120,88 mm < Batas (OK)

Sehingga, perencanaan bangunan yang tahan tsunami sudah sesuai dengan yang telah disyaratkan.

V. KESIMPULAN/RINGKASAN

Berdasarkan hasil analisis serta kalkulasi, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut: (1) Hasil analisa SAP200 V22 pada permodelan telah memenuhi kontrol Partisipasi Massa,

Kontrol Periode Getar Struktur, Kontrol Nilai Akhir Respons Spektrum, Kontrol Simpangan Antar Lantai, & Kontrol Sistem Ganda. (2) Hasil Perencanaan Struktur Primer. (a) Balok Induk (Lantai 1 – 6 = BJ – 41 WF 800 x 300 x 14 x 26, Lantai 7 – 12 = BJ – 41 WF 800 x 300 x 14 x 22. (b) Kolom (Lantai 1 – 5 = BJ – 41 WF 500 x 500 x 70 x 80, Lantai 6 – 8 = BJ – 41 WF 400 x 400 x 30 x 50, Lantai 9 – 11 = BJ – 41 WF 400 x 400 x 25 x 30). (3) Link direncanakan dengan link pendek (*short link*) dengan profil WF 700 x 300 x 15 x 28, karena didesain untuk lebih lemah dari balok di luar link. (4) Pengaku (*bracing*) menggunakan profil WF 400 x 400 x 25 x 30. (5) Perencanaan Struktur Bawah, pondasi menggunakan tiang pancang (spun pile) dari PT. WIKA (Wijaya Karya) Beton, dengan diameter 800 mm kelas C untuk kedua tipe pondasi. Pondasi tipe 1 dipancang pada kedalaman 20 m, pondasi tipe 2 dipancang pada kedalaman 18 m. Penulangan poer menggunakan D25 – 100 mm pada arah X dan Y untuk tipe pondasi 1 dan 2. Pushover analysis sudah memenuhi target dengan level kinerja bangunan, yaitu *Immediate Occupancy*, dengan deformasi 99 mm pada arah X, serta 120 mm pada arah Y.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. E. Larsen, D. R. Fuhrman, C. Baykal, and B. M. Sumer, "Tsunami-induced scour around monopile foundations," *Coast. Eng.*, vol. 129, no. January, pp. 36–49, 2017, doi: 10.1016/j.coastaleng.2017.08.002.
- [2] S. Karafagka, S. Fotopoulou, and K. Pitilakis, "Analytical tsunami fragility curves for seaport RC buildings and steel light frame warehouses," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 112, no. September 2017, pp. 118–137, 2018, doi: 10.1016/j.soildyn.2018.04.037.
- [3] L. A. Nugraha, Supardi, and A. Supriyadi, "Evaluasi kekuatan dan detailing tulangan kolom beton bertulang sesuai SNI 2847 : 2013 dan SNI 1726 : 2012 (Studi kasus: Hotel 10 lantai di Semarang)," *e-Jurnal Matriks Tek. Sipil*, vol. 2012, no. September, pp. 887–894, 2017.
- [4] S. Kazemzadeh Azad and C. Topkaya, "A review of research on steel eccentrically braced frames," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 128, pp. 53–73, 2017, doi: 10.1016/j.jcsr.2016.07.032.
- [5] E. P. Popov and M. D. Engelhardt, "Seismic eccentrically braced frames," *Struct. Des. Tall Build.*, vol. 2, no. 1, pp. 53–74, 1993, doi: 10.1002/tal.4320020105.
- [6] M. Zameeruddin and K. K. Sangle, "Review on Recent developments in the performance-based seismic design of reinforced concrete structures," *Structures*, vol. 6, pp. 119–133, 2016, doi: 10.1016/j.istruc.2016.03.001.
- [7] Federal Emergency Management Agency P-646, "Guidelines for design of structures for vertical evacuation from tsunamis," *Jetty Ecn Purdue Edu*, p. 176, 2019.
- [8] H. Qiao, Y. Chen, J. Wang, and C. Chen, "Experimental study on beam-to-column connections with reduced beam section against progressive collapse," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 175, p. 106358, 2020, doi: 10.1016/j.jcsr.2020.106358.
- [9] Badan Standardisasi Nasional, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung (SNI 1726:2019)*, 1st ed. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2019.
- [10] A. Atc, "40, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," *Appl. Technol. Counc.*, vol. 1, p. 334, 1996.