
**PERBANDINGAN BEBAN GEMPA RENCANA HASIL ANALISIS MENGGUNAKAN
METODE STATIK EKIVALEN DAN RESPON SPEKTRUM BERDASARKAN SNI
1726-2012**

Aulia Annisa¹, I Gusti Made Oka² dan Gidion Turu'allo³

Jurusan Teknik Sipil Universitas Tadulako (Untad) Palu

Jl. Soekarno-Hatta Km. 9 Palu, Sulawesi Tengah

Email : auliaani.aa@gmail.com

Abstrak

Analisis beban rencana gempa dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu secara statik dan dinamik. Secara statik, metode yang dapat digunakan adalah metode statik ekuivalen dan secara dinamik, salah satu metodenya adalah metode respon spektrum. Pada tulisan ini, direncanakan struktur berupa gedung perkantoran bertingkat 6 (enam) menggunakan hasil analisis terbesar dari kedua metode tersebut. Struktur yang direncanakan merupakan struktur tahan gempa dengan sistem penahan gaya gempa berupa sistem ganda dengan rangka beton bertulang pemikul momen khusus (SRPMK) dan dinding geser beton bertulang khusus. Material struktur yang digunakan dalam perencanaan adalah beton dengan mutu $f'c = 35$ MPa, baja tulangan BjTP Grade 24 ($f_y = 235$ MPa), dan baja tulangan BjTS Grade 40 ($f_y = 390$ MPa). Akibat beban rencana gempa yang ditambahkan pada struktur, dihasilkan simpangan antar lantai maksimum sebesar 52,068 mm untuk metode statik ekuivalen dan 50,464 mm untuk metode respon spektrum, kedua nilai tersebut telah memenuhi syarat simpangan yaitu kurang dari simpangan lantai ijin sebesar 100 mm. Dari perbandingan kedua metode, diperoleh hasil terbesar adalah hasil analisis struktur menggunakan metode statik ekuivalen, yang kemudian digunakan dalam perencanaan elemen struktur. Dimensi elemen struktur yang digunakan diseragamkan untuk setiap tingkat, dengan ukuran balok induk 40/60, balok anak 25/40, kolom 95/95, pelat dengan tebal 120 mm dan tebal dinding geser 300 mm.

Kata kunci: Sistem Ganda, SRPMK, Dinding Geser, Analisis Statik Ekuivalen, Respon Spektrum

ABSTRACT

Design earthquake load analysis can be done in two ways, statically and dynamically. For static analysis, one of the methods is equivalent static method, while for dynamic analysis, one of the methods is response spectrum method. In this work, a six-storey office building will be designed using whichever method results in greater design earthquake load. The designed structure is an earthquake-resistant structure with dual system, with special moment resisting frame (SMRF) and special shear wall for reinforced concrete. The materials used in design are concrete with a strength of $f'c = 35$ MPa, reinforcement steel BjTP Grade 24 ($f_y = 235$ MPa), and reinforcement steel BjTS Grade 40 ($f_y = 390$ MPa). The maximum inter-storey drift caused by design earthquake load using equivalent static method is 52,068 mm, and 50,464 mm using response spectrum method, both of these values are less than the maximum inter-storey drift which is 100 mm. Between the two methods, the one that resulted in greater design earthquake load is equivalent static method, which is then used in designing the structural elements. The structural elements dimensions are uniform for every storey, main beam with the dimension of 40/60, secondary beam with the dimension of 25/40, column with the dimension of 95/95, slab with a thickness of 120 mm and shear wall with a thickness of 300 mm.

Key words: Dual System, SMRF, Shear Wall, Equivalent Static Analysis, Response Spectrum

1. Pendahuluan

Gempa merupakan bencana yang tergolong sangat berbahaya, dikarenakan bencana ini dapat mengakibatkan kerusakan pada struktur bangunan dalam waktu yang singkat dan tidak dapat diprediksi kapan akan terjadi. Sehingga seringkali saat gempa terjadi, banyak bangunan yang mengalami kerusakan dan berakibat adanya korban jiwa. Hal ini disebabkan, karena pada umumnya bangunan tidak direncanakan terhadap adanya gempa bumi.

Sulawesi Tengah merupakan salah satu daerah rawan bencana gempa bumi di Indonesia, karena terletak dekat dengan sumber gempa bumi yang berada di darat dan di laut. Sumber gempa di darat berasal dari beberapa sesar aktif, salah satunya yaitu sesar Palu-Koro. Sesar Palu-Koro merupakan sesar utama di Pulau Sulawesi dan tergolong sebagai sesar aktif (Bellier et al. , 2001). Oleh karena itu, sudah selayaknya bangunan tinggi di kota Palu harus direncanakan terhadap adanya kemungkinan terjadi gempa besar yang dapat beresiko tinggi pada kerusakan struktur bangunan.

Struktur gedung tahan gempa merupakan struktur yang direncanakan tidak hanya dapat menahan gaya gravitasi, namun juga dapat menahan adanya gaya lateral akibat beban gempa. Salah satu sistem penahan gaya gempa yang cocok digunakan pada gedung bertingkat adalah sistem ganda, yaitu gabungan sistem pemikul beban lateral berupa dinding geser dengan sistem rangka pemikul momen Rangka pemikul momen, selain memikul gaya gravitasi juga harus direncanakan mampu memikul minimal 25% dari seluruh beban lateral yang bekerja dan kemudian sisa dari beban lateral akan dipikul bersama-sama oleh kedua sistem terkait adanya interaksi antar dua sistem tersebut.

Untuk memberikan pembebanan akibat gempa pada struktur diperlukan analisis beban, berdasarkan SNI 1726-2012 analisis beban gempa dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu secara statik dan dinamik. Secara statik, metode yang dapat digunakan adalah metode statik ekuivalen dan secara dinamik, salah satu metodenya adalah metode respon spektrum. Statik ekuivalen merupakan cara analisis struktur di mana pengaruh gempa pada struktur dianggap sebagai beban statik horizontal, sedangkan metode respon spektrum merupakan metode analisis di mana total respon didapat melalui superposisi dari respon masing-masing ragam getar. Perbedaan dari kedua analisis beban gempa yaitu konsep dinamik memperhitungkan massa, kekakuan dan redaman, sedangkan konsep statik hanya memperhitungkan massa saja (Widodo, 2001).

2. Kajian Pustaka

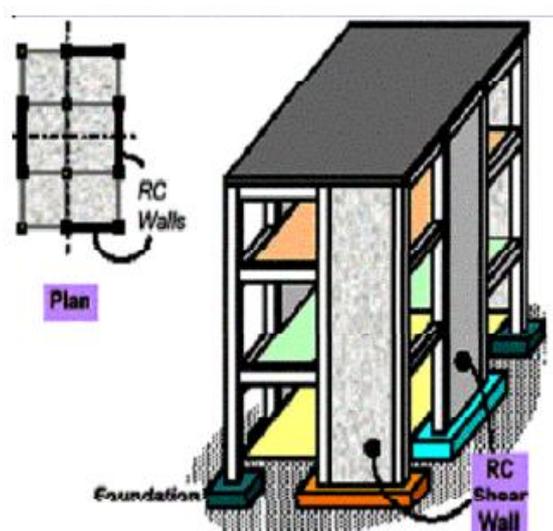
2.1. Sistem Struktur Rangka-Dinding Geser (Dual System)

Rangka beton bertulang terbagi ke dalam 3 tipe sistem rangka pemikul momen menurut tingkat daktilitasnya, yakni sistem rangka pemikul momen biasa (SRPMB), sistem rangka pemikul momen menengah (SRPMM) dan sistem pemikul momen khusus (SRPMK) dengan tingkat daktilitasnya yang paling tinggi diantara ketiga sistem tersebut. SRPMK direncanakan bersifat daktail penuh pada saat menerima beban lateral, dalam hal ini adalah beban gempa dengan beberapa syarat pendetailan yang

harus terpenuhi diantaranya terjadinya sendi plastis pada kedua ujung balok dan kolom serta terpenuhi syarat bahwa kekuatan kolom lebih tinggi dibandingkan balok (strong column-weak beam).

Dinding geser yang merupakan sistem gabungan dalam sistem ganda yang digunakan bersama dengan SRPMK merupakan suatu elemen struktur vertikal yang mampu menahan gaya lateral. Dinding geser (shear wall) didefinisikan sebagai komponen struktur vertikal yang relatif sangat kaku. Dinding geser pada umumnya hanya boleh mempunyai bukaan sekitar 5% agar tidak mengurangi kekakuannya. Fungsi dinding geser berubah menjadi dinding penahan beban (bearing wall), jika dinding geser menerima beban tegak lurus dinding geser.

Dinding berperilaku seperti balok kantilever dari pondasi, dan seperti halnya balok, kekuatan yang dihasilkan diperoleh dari kedalaman pondasi. Dinding ini umumnya dimulai dari pondasi dan diteruskan sampai ke puncak gedung. Ketebalannya minimal 150 mm atau bisa mencapai 400 mm untuk gedung yang sangat tinggi. Dinding geser itu seperti balok lebar yang berorientasi secara vertikal yang mampu meneruskan beban gempa ke dalam pondasi. Ilustrasi dinding geser beton bertulang pada gedung dapat dilihat pada Gambar 1 berikut ini:

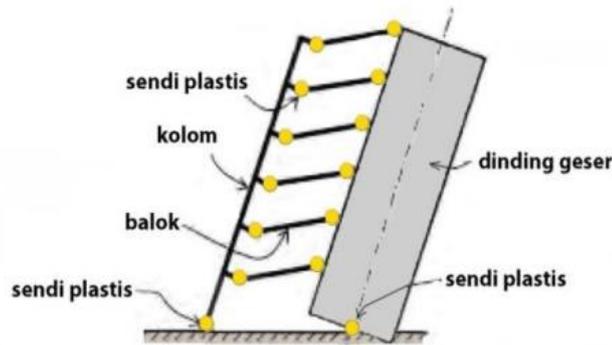


Gambar 1. Dinding Geser Beton Bertulang pada Gedung (ATC/SEAOC Training Seminars (ATC-48))

Dalam perencanaan bangunan tahan gempa, terbentuknya sendi-sendi plastis mampu memancarkan energi gempa dan membatasi besarnya beban gempa yang masuk ke dalam struktur, harus dikendalikan agar struktur tidak sampai mengalami keruntuhan saat terjadi gempa besar. Pengendalian terbentuknya sendi-sendi plastis terlebih dahulu ditentukan secara pasti terlepas dari kekuatan dan karakteristik gempa (Vis dan Gideon, 1994). Untuk mengatasi kerusakan fatal dapat diatasi dengan desain kapasitas yang memiliki daktilitas penuh. Pada prinsipnya, perencanaan dengan metode daktail menggunakan konsep strong coloumn-weak beam yang mengarahkan

mekanisme keruntuhan struktur yang terjadi pada balok (beam sway mechanism) dengan cara pembentukan sendi plastis pada balok sehingga mekanisme keruntuhan pada kolom dapat dihindari.

Bentuk atau penempatan lokasi sendi plastis pada sistem ganda yang disarankan seperti Gambar 2 berikut :



Gambar 2. Penempatan Lokasi Sendi Plastis pada Sistem Ganda

2.2. Analisis Statik Ekuivalen

Beban statik ekuivalen adalah suatu representasi dari beban gempa setelah disederhanakan dan dimodifikasi, yang mana gaya inersia yang bekerja pada suatu massa akibat gempa disederhanakan menjadi beban statik. Analisis statik ekuivalen kurang teliti apabila dibandingkan dengan analisis dinamik, karena pada analisis ekuivalen statik hanya memperhitungkan pengaruh mode ke-1 (Widodo, 2001).

Prosedur dalam melakukan analisis statik ekuivalen hingga diperoleh distribusi gaya lateral untuk masing-masing lantai pada bangunan gedung tahan gempa dilakukan berdasarkan SNI 1726-2012. Untuk memperoleh nilai gaya lateral gempa metode analisis statik ekuivalen dapat dihitung dengan persamaan 1 sampai dengan 5 berikut :

$$V = C_S \cdot W \quad (1)$$

$$C_S = \frac{S_{DS}}{(R/I_e)} \quad (2)$$

kemudian nilai C_S yang dihitung dengan tidak perlu melebihi :

$$C_S = \frac{S_{D1}}{T(R/I_e)} \quad (3)$$

dan C_S harus tidak kurang dari :

$$C_S = 0,044 S_{DS} I_e \geq 0,01 \quad (4)$$

Sebagai tambahan untuk struktur yang berlokasi di daerah dimana S_1 sama dengan atau lebih besar dari 0,6g maka C_S harus tidak kurang dari :

$$C_S = \frac{0,5 \cdot S_1}{(R/I_e)} \quad (5)$$

dimana:

S_{DS} : Parameter percepatan spektrum respons desain dalam rentang perioda pendek (g)

R : Faktor modifikasi respons

L_e : Faktor keutamaan gempa

S_{D1} : Parameter percepatan spektrum respons desain pada perioda sebesar 1,0 detik (g)

T : Periode fundamental struktur (detik)

S_1 : Percepatan batuan dasar pada periode 1 detik (g)

V : Geser dasar total (kN)

C_S : Koefisien respon seismik

W : Berat seismik efektif struktur (kN)

Kemudian Berdasarkan SNI 1726-2012 Pasal 7.8.3, gaya gempa lateral (F_x , F_y) yang timbul disemua tingkat harus ditentukan dari persamaan 6 sampai 8 berikut :

$$F_x = C_{Vx} \cdot V_x \quad (6)$$

$$F_y = C_{Vy} \cdot V_y \quad (7)$$

$$C_V = \frac{w_x \cdot h_i^k}{\sum_{i=1}^n w_i \cdot h_i^k} \quad (8)$$

dimana :

F_x , F_y : Gaya gempa lateral (kN)

C_{Vx} , C_{Vy} : Faktor distribusi vertikal

V_x , V_y : Gaya lateral desain total atau geser didasar struktur (kN)

w_i , w_x : Berat seismik efektif total struktur yang ditempatkan atau dikenakan pada tingkat i atau x (kN)

h_i , h_x : Tinggi dari dasar sampai tingkat i atau x (m)

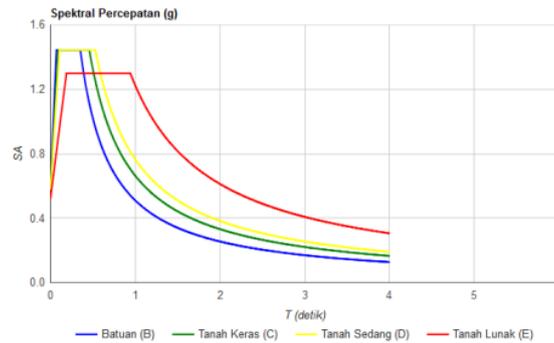
k : Eksponen yang terkait dengan perioda struktur sebagai berikut - untuk struktur yang mempunyai perioda sebesar 0,5 detik atau kurang, $k = 1$ - untuk struktur yang mempunyai perioda sebesar 2,5 detik atau lebih, $k = 2$ - untuk struktur yang mempunyai perioda antara 0,5 dan 2,5 detik, k harus sebesar 2 atau harus ditentukan dengan interpolasi linier antara 1 dan 2

2.3. Analisis Respon Spektrum

Respon spektrum adalah suatu spektrum yang disajikan dalam bentuk grafik/plot antara periode getar struktur T , lawan respon-respon maksimum berdasarkan rasio redaman dan gempa tertentu. Respon-respon maksimum dapat berupa simpangan maksimum (*spectral displacement*, S_D) kecepatan maksimum (*spectral velocity*, S_V) atau percepatan maksimum (*spectral acceleration*, S_a) massa struktur *single degree of freedom* (SDOF), (Widodo, 2001). Analisis dinamik respon spektrum pada suatu struktur dihitung dengan bantuan *software SAP2000*. Analisis menggunakan *SAP2000*

dilakukan dengan memberikan beban gempa kepada struktur dalam bentuk kurva respon spektra sesuai SNI 1726-2012.

Selain itu kurva respon spektra juga dapat diperoleh dari hasil plot koordinat lokasi gedung pada situs http://puskim.pu.go.id/Aplikasi/desain_spektra_indonesia_2011/ seperti terlihat pada Gambar 3 berikut ini:



Gambar 3. Kurva respon spektra daerah kota Palu (http://puskim.pu.go.id/Aplikasi/desain_spektra_indonesia_2011/)

Dalam melakukan input respon spektra, selain memperhatikan metode kombinasi modal yang akan digunakan yaitu menggunakan CQC atau SRSS, hal lain yang juga perlu diperhatikan adalah faktor skala berkaitan fungsi dan peruntukkan gedung seperti pada persamaan 9 berikut:

$$f = \frac{I_e}{R} \tag{9}$$

dimana :

f : faktor skala (Nilai faktor skala dinyatakan dalam percepatan gravitasi bumi (g) yaitu 9,81 m/detik

I_e : faktor keutamaan gempa

R : koefisien modifikasi respon

Pada metode respon spektrum, perlu dilakukan pengecekan pada hasil akhir analisis. Pengecekan dilakukan terhadap gaya geser dasar hasil analisis beban. Berdasarkan SNI 1726-2012 Pasal 7.9.4.1, jika gaya geser dasar hasil kombinasi ragam atau analisis respon spektrum, (V_t) lebih kecil 85% dari geser dasar yang dihitung (V_1) menggunakan prosedur gaya lateral ekuivalen, maka gaya geser dasar tersebut harus dikalikan dengan $0,85 V_1/V_t$ seperti persamaan 10 berikut:

$$\frac{85\%V_1}{V_{tX}} \tag{10}$$

3. Data dan Metode Perencanaan

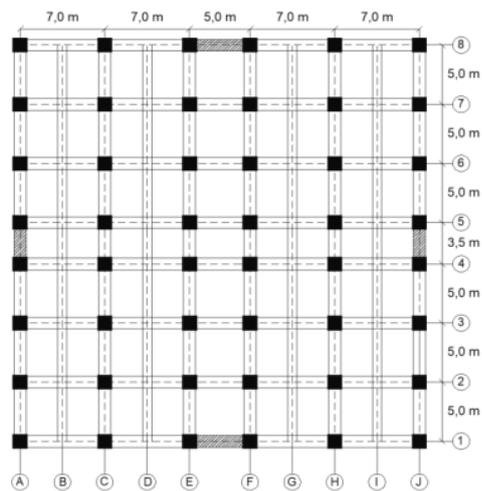
3.1. Data Perencanaan

Gedung yang direncanakan merupakan perkantoran berlantai 7 (tujuh) dengan tinggi lantai 4,0 meter. Sistem struktur atas yang digunakan adalah sistem ganda rangka beton bertulang pemikul

momen khusus dan dinding geser beton bertulang khusus. Tipe kolom yang digunakan adalah kolom persegi dengan sengkang ikat, sedangkan untuk struktur bawah digunakan pondasi tiang bor (bored pile).

Material struktur yang digunakan terdiri dari beton dengan kuat tekan $f'_c = 35$ MPa, baja tulangan polos Grade 24 (BjTP 24, $f_y = 235$ MPa), dan baja tulangan ulir Grade 40 (BjTS 40, $f_y = 390$ MPa).

Denah gedung dibuat sederhana dan simetris untuk menambah ketahanan terhadap gempa dengan mengurangi efek torsi. Denah gedung rencana dapat dilihat pada Gambar 4 di bawah ini.



Gambar 4. Denah Gedung

3.2. Metode Perencanaan

Diagram alir di bawah menunjukkan secara ringkas prosedur perencanaan yang dilakukan dalam tugas akhir ini yang dapat dilihat pada Gambar 5.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Estimasi Dimensi Elemen Struktur

Estimasi dimensi elemen struktur yang akan dipakai dalam perencanaan, didasarkan pada hasil analisis terhadap dimensi minimumnya. Adapun dimensi elemen struktur tersebut adalah seperti yang diperlihatkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Dimensi Elemen Struktur

Elemen Struktur	Dimensi (mm)	Keterangan
Balok	400 x 600	Balok Induk
	250 x 400	Balok Induk
Kolom	950 x 950	Seragam
Pelat	120 (Tebal)	Seragam
Dinding Geser	300 (Tebal)	Seragam

4.2 Pemodelan Struktur

Tiga Dimensi Pemodelan tiga dimensi struktur gedung berdasarkan dimensi elemen yang telah dihitung sebelumnya dapat dilihat pada Gambar 6 berikut.

4.3 Pembebanan Struktur

Beban-beban yang bekerja pada struktur meliputi beban gravitasi dan beban gempa. Beban gravitasi terdiri dari beban mati dan beban hidup, diuraikan seperti berikut:

a. Beban mati (D)

- Berat sendiri elemen struktural dan nonstruktural (dihitung secara otomatis oleh SAP2000).
- Beban finishing pelat atap, $Q = 1,93 \text{ kN/m}$
- Beban finishing pelat lantai, $Q = 1,41 \text{ kN/m}^2$
- Beban dinding partisi, $Q = 8,704 \text{ kN/m}$

b. Beban hidup (L)

- Beban hidup pada atap, $Q = 0,96 \text{ kN/m}^2$
- Beban hidup pada lantai dasar, $Q = 4,79 \text{ kN/m}^2$
- Beban hidup pada lantai di atas lantai dasar, $Q = 3,83 \text{ kN/m}^2$

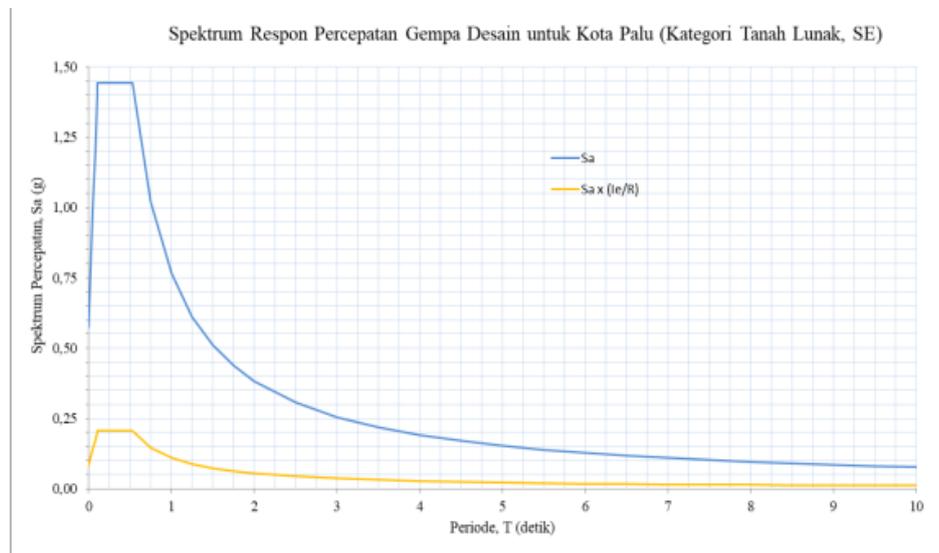
Sementara itu, beban gempa rencana yang digunakan untuk mendesain dianalisis menggunakan 2 metode yaitu metode statik ekuivalen dan metode respon spektrum. Sebelum melakukan analisis beban gempa terlebih dahulu ditentukan beberapa nilai parameter analisis beban gempa seperti berikut :

1. Parameter Analisis Beban Gempa

- a. Kategori resiko: II (gedung perkantoran)
- b. Faktor keutamaan gempa, $I_e = 1,0$
- c. Klasifikasi situs: Tanah lunak, SE
- d. Nilai $S_S = 2,164(g)$ ▼
- e. Nilai $S_1 = 0,765(g)$ ▲ |
- f. Faktor $F_a = 1,$
- g. Faktor $F_v = 1,5$
- h. Respon percepatan $S_{MS} = 2,164(g)$
- i. Respon percepatan $S_{M1} = 1,147(g)$
- j. Respon percepatan $S_{DS} = 1,443(g)$
- k. Respon percepatan $S_{D1} = 0,765(g)$
- l. Periode $T_S = 0,530$ detik
- m. Periode $T_0 = 0,106$ detik
- n. Kategori Desain Seismik: E

- o. Koefisien modifikasi respon, $R = 7$
- p. Faktor pembesaran defleksi, $C_D = 1.52$

Grafik spektrum respon percepatan gempa yang dibuat sesuai dengan variabel-variabel di atas, dapat dilihat pada Gambar 7 berikut.



Gambar 5. Spektrum Respon Percepatan Gempa Desain untuk Kota Palu (Kategori Tanah Lunak, SE)

2. Perhitungan Gaya Lateral Ekuivalen (Metode Statik Ekuivalen)
 - a. Periode fundamental struktur, $T_a = 0,5291$ detik
 - b. Berat seismik efektif struktur, $W_{total} = 98142,412$ kN
 - c. Koefisien respons seismik, $C_s = 0,206$
 - d. Nilai gaya geser dasar seismik, $V = 20226,684$ kN
 - e. Gaya lateral ekuivalen

Untuk perhitungan gaya lateral ekuivalen pada arah x dan y dapat dilihat pada Tabel 3 berikut ini:

Tabel 3. Gaya Gempa Lateral Ekuivalen Per Lantai Arah x dan y

Lantai	Berat, w_i (kN)	Tinggi, h_i (m)	$w_i h_i^k$ (kN.m)	F (kN)	$F_x(1/8.F)$ (kN)	$F_y(1/6.F)$ (kN)
Atap	12925,629	24	310215,084	4707,7917	588,474	784,632
6	17043,357	20	340867,135	5172,964023	646,621	862,161
5	17043,357	16	272693,708	4138,371218	517,296	689,729
4	17043,357	12	204520,281	3103,778414	387,972	517,296
3	17043,357	8	16346,854	2069,185609	258,648	344,864
2	17043,357	4	68173,427	1034,593	129,324	172,432
Σ			1332816,489			

Untuk melakukan analisis struktur pada *SAP2000* diperlukan kombinasi pembebanan dari beban-beban yang diperhitungkan bekerja pada struktur yaitu berupa beban gravitasi (beban mati dan hidup). Selain itu karena bangunan direncanakan tahan terhadap adanya gempa, maka kombinasi pembebanan ditambahkan dengan beban gempa. Pada kombinasi dengan tambahan beban gempa, faktor terhadap beban hidup direduksi hingga 0,5 serta dimasukkan nilai $S_{DS} = 1,443$ dan faktor reduksi, ρ sebesar 1,3. Kemudian untuk memudahkan dalam menentukan nilai maksimum dari semua kombinasi, ditambahkan satu kombinasi yaitu *Envelope*. Sebagaimana yang diperlihatkan dalam Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Kombinasi Pembebanan

Label	Kombinasi Beban
Comb. 1	$1,4D$
Comb. 2	$1,2D + 1,6L$
Comb. 3	$1,49D + 1,3Q_X + 0,39Q_Y + 0,5L$
Comb. 4	$1,49D + 0,39Q_X + 1,3Q_Y + 0,5L$
Comb. 5	$0,61D + 1,3Q_X + 0,39Q_Y$
Comb. 6	$0,61D + 0,39Q_X + 1,3Q_Y$
<i>Envelope</i>	Nilai Maksimum

Keterangan:

D : Beban mati

L : Beban hidup

Q_X : Beban gempa arah x

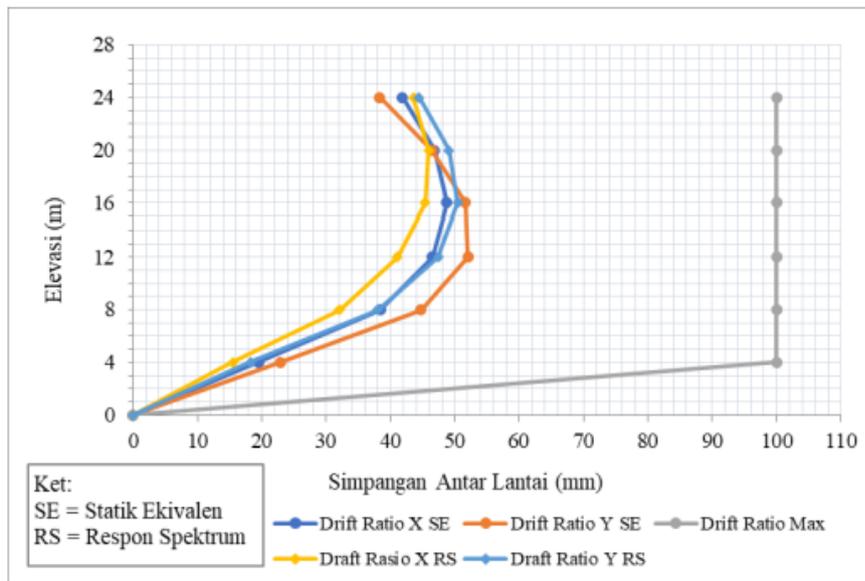
Q_Y : Beban gempa arah y

4.4 Hasil Analisis Struktur

Dari hasil analisis struktur menggunakan bantuan program *SAP2000* diperoleh bahwa ragam getar (*mode shape*) pertama dan kedua struktur saat dilakukan vibrasi bebas ialah didominasi oleh gerak translasi.

Sementara itu, nilai rasio partisipasi massa yang diperoleh dari 18 ragam getar sudah memenuhi persyaratan untuk mendapatkan total partisipasi massa ragam terkombinasi minimal 90% pada arah sumbu x dan y (gerak translasi). Waktu getar alami fundamental yang dimiliki struktur adalah sebesar $T = 0,5291$ detik.

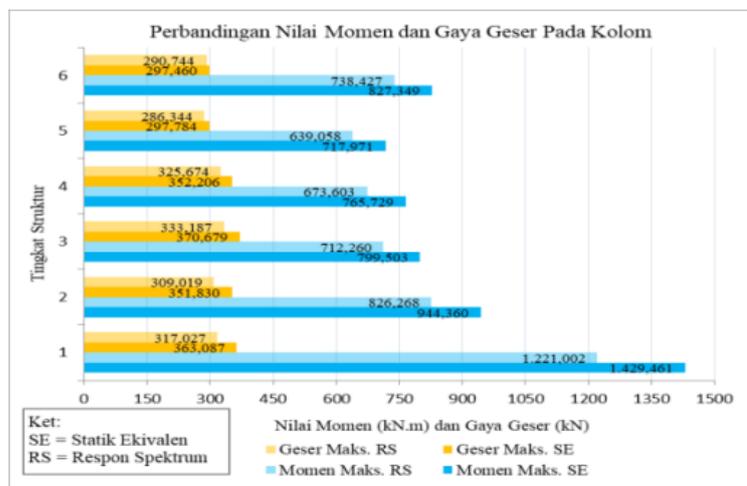
Untuk memastikan bahwa dimensi maupun geometri struktur telah mencukupi untuk menjamin struktur berperilaku elastik selama terjadi gempa, maka perlu dilakukan pemeriksaan terhadap simpangan antar lantai pada struktur akibat beban gempa rencana dari kedua metode analisis beban gempa baik statik ekuivalen maupun respon spektrum. Gambar 8 berikut memperlihatkan grafik simpangan antar lantai yang terjadi pada struktur.



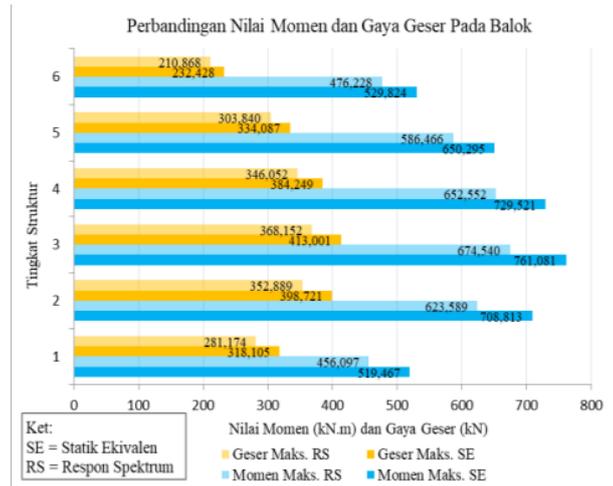
Gambar 6. Simpangan Antar Lantai

Hasil pemeriksaan di atas menunjukkan bahwa simpangan antar lantai yang terjadi pada masing-masing arah sumbu x dan sumbu y untuk kedua metode nilainya kurang dari simpangan antar lantai maksimum yang diijinkan, yang artinya simpangan antar lantai yang terjadi telah memenuhi syarat. Setelah diketahui memenuhi syarat, langkah selanjutnya yaitu membandingkan nilai gaya dalam elemen struktur dari hasil analisis *SAP2000* menggunakan kedua metode tersebut.

Elemen struktur yang digunakan pada perbandingan gaya dalam adalah balok dan kolom. Gaya dalam yang dibandingkan pada balok adalah nilai momen dan gaya geser, sedangkan untuk kolom menggunakan nilai momen, gaya geser dan juga gaya aksial. Gambar 9 memperlihatkan grafik perbandingan nilai gaya dalam pada balok, sedangkan Gambar 10 memperlihatkan grafik perbandingan nilai gaya dalam pada kolom.



Gambar 7. Grafik Perbandingan Nilai Gaya Dalam Pada Balok



Gambar 8. Grafik Perbandingan Nilai Momen dan Gaya Geser Pada Kolom

Dari hasil perbandingan, diperoleh hasil bahwa nilai gaya dalam terbesar dari kedua metode merupakan hasil analisis metode Statik Ekuivalen. Sehingga dapat diputuskan bahwa hasil analisis yang akan digunakan dalam perencanaan elemen struktur selanjutnya adalah hasil analisis dari metode Statik Ekuivalen.

Persentase antara reaksi dari perletakan dinding geser maupun dari perletakan kolom (perletakan sistem rangka pemikul momen) untuk semua kombinasi pembebanan yang mengandung beban gempa dapat dilihat pada Tabel 5.

Dari Tabel 5 dapat dilihat bahwa untuk semua kombinasi pembebanan yang mengandung beban gempa, persentase dari sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) nilainya lebih besar dari 25%. Hal ini berarti konfigurasi struktur gedung telah memenuhi syarat sebagai struktur sistem ganda sesuai dengan SNI 1726:2012 Pasal 7.2.5.1.

Tabel 5. Persentase *Joint Reactions* Perletakan SRPMK dan Dinding Geser

No.	Kombinasi	Persentase (%)			
		Arah x		Arah y	
		SRPMK	Dinding Geser	SRPMK	Dinding Geser
1	COMB3	56,106	43,894	63,672	36,328
2	COMB4	56,106	43,894	63,672	36,328
3	COMB5	56,106	43,894	63,672	36,328
4	COMB6	56,106	43,894	63,672	36,328

4.5 Hasil Desain Elemen Struktur

Berikut adalah hasil desain elemen struktur untuk struktur gedung yang direncanakan:

- a. Penulangan pelat

Penulangan pelat yang diperoleh dari hasil desain adalah digunakan tulangan lentur $\emptyset 12-150$ pada arah melintang dan memanjang serta tulangan bagi menggunakan tulangan diameter $\emptyset 10-300$.

b. Penulangan balok

Tulangan balok ditinjau untuk daerah tumpuan positif dan negatif, serta untuk daerah lapangan. Jumlah tulangan terbanyak diperoleh pada balok lantai 4 yaitu 13D22 untuk daerah tumpuan negatif dan 11D22 untuk daerah tumpuan positif, sedangkan penulangan geser terbesar terdapat pada lantai 5 yaitu $\emptyset 14-45$.

c. Penulangan kolom

Dari hasil desain, tulangan longitudinal kolom terbanyak terdapat pada kolom pada lantai dasar, yaitu 32D25. Sedangkan, penulangan geser kolom seragam untuk setiap tingkat yaitu $4\emptyset 14-50$ untuk daerah l_0 dan $3\emptyset 14-150$ untuk daerah di luar l_0 .

d. Penulangan geser *joint*

Untuk penulangan geser *joint*, digunakan tulangan geser yang sama dengan tulangan geser kolom pada daerah sepanjang l_0 yaitu $4\emptyset 14-50$.

e. Penulangan dinding geser

Untuk dinding geser, tulangan vertical dan horizontal diseragamkan pada masing-masing arah yaitu 2D22-135 untuk arah x dan 2D22-100 untuk arah y. Sedangkan untuk penulangan komponen batas diseragamkan pada semua arah dengan tulangan longitudinal sebesar 20D22 dan tulangan geser sebesar $4\emptyset 10-50$.

f. Struktur bawah

Tipe struktur bawah (pondasi) yang digunakan ialah pondasi *bored pile* berdiameter 500 mm dengan jumlah tulangan longitudinal yaitu 8D19. Digunakan dua tipe *pile cap* dengan dimensi 2000×2000 untuk kelompok 4 tiang *borpile* dan *pile cap* ukuran 2000×3000 untuk kelompok 6 tiang *borpile*. Selanjutnya, untuk dinding geser arah x dibutuhkan 12 buah *bored pile* dengan *pile cap* sebesar 7000×2000 , sedangkan dinding geser arah y dibutuhkan 10 buah *bored pile* dengan *pile cap* sebesar 5500×2000 . Tebal *pile cap* seragam untuk seluruh titik yaitu 500 mm dengan dimensi balok pengikat yang digunakan sebesar 350/550.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis struktur dan desain yang telah dilakukan sebelumnya, penulis dapat mengambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari hasil rasio partisipasi massa diketahui bahwa struktur pada periode awal didominasi oleh gerak translasi bukan rotasi. Kemudian, diperoleh waktu getar alami struktur pada mode pertama sebesar 0,4946 detik, yang selanjutnya perlu diperiksa terhadap syarat periode struktur sebelum digunakan sebagai periode fundamental struktur. Setelah dilakukan pemeriksaan, diketahui bahwa waktu getar alami struktur kurang dari periode struktur pendekatan, sehingga periode fundamental struktur yang digunakan adalah T_a sebesar 0,5291 detik

2. Dari hasil analisis struktur terhadap menggunakan metode statik ekuivalen dan respon spektrum, diperoleh:
 - a) Gaya geser dasar hasil analisis statik ekuivalen sebesar 20226,684 kN dan gaya geser dasar hasil analisis respon spektrum yang telah diperiksa terhadap gaya geser dasar statik, yaitu sebesar 17192,681 kN.
 - b) Simpangan antar lantai maksimum untuk metode statik ekuivalen terjadi pada lantai 3 dengan nilai simpangan sebesar 52,068 mm, sedangkan untuk metode respon spektrum simpangan maksimum terjadi pada lantai 4 dengan nilai sebesar 50,464 mm. Kedua nilai simpangan maksimum tersebut telah memenuhi syarat, yaitu kurang dari nilai simpangan antar lantai ijin sebesar 100 mm.
3. Dari hasil perbandingan gaya-gaya dalam pada elemen struktur yaitu balok dan kolom hasil analisis metode statik ekuivalen dan respon spektrum, diperoleh hasil bahwa gaya dalam yang terbesar dari kedua metode adalah hasil dari analisis menggunakan metode statik ekuivalen.
4. Hasil analisis struktur menggunakan metode statik ekuivalen telah memenuhi syarat sebagai struktur sistem ganda dengan presentase SRPMK sebesar 56,106% untuk arah x dan 63,672% untuk arah y, lebih dari syarat minimum yaitu 25%.
5. Perencanaan dan desain penulangan pada elemen struktur menggunakan hasil analisis struktur metode statik ekuivalen, diperoleh hasil sebagai berikut:
 - a) Elemen pelat dengan tebal 120 mm merata untuk semua lantai menggunakan tulangan lentur $\emptyset 12-150$ dan tulangan bagi $\emptyset 10-300$.
 - b) Elemen balok dimensi 400/600 seragam untuk semua lantai dengan penulangan lentur terbesar terdapat pada lantai 4 yaitu 13D22 untuk daerah tumpuan negatif dan 11D22 untuk daerah tumpuan positif, sedangkan penulangan geser terbesar terdapat pada lantai 5 yaitu $\emptyset 14-45$.
 - c) Elemen kolom dengan dimensi 950/950 yang juga seragam dari lantai dasar hingga lantai 7 memiliki jumlah tulangan longitudinal terbesar pada lantai dasar, yaitu 32D25. Sedangkan, penulangan geser kolom seragam untuk setiap tingkat yaitu 4 $\emptyset 14-50$ untuk daerah l_o dan 3 $\emptyset 14-150$ untuk daerah di luar l_o .
 - d) Untuk penulangan geser join, digunakan tulangan geser yang sama dengan tulangan geser kolom pada daerah sepanjang l_o yaitu 4 $\emptyset 14-50$.
 - e) Elemen dinding geser dengan tebal 300 mm, tulangan vertical dan horizontal diseragamkan pada masing-masing arah yaitu 2D22-135 untuk arah x dan 2D22-100 untuk arah y. Sedangkan untuk penulangan komponen batas diseragamkan pada semua arah dengan tulangan longitudinal sebesar 20D22 dan tulangan geser sebesar 4 $\emptyset 10-50$.
 - f) Tipe struktur bawah (pondasi) yang digunakan ialah pondasi *bored pile* berdiameter 500 mm dengan jumlah tulangan longitudinal yaitu 8D19. Digunakan dua tipe *pile cap* dengan dimensi

2000×2000 untuk kelompok 4 tiang *borpile* dan *pile cap* ukuran 2000×3000 untuk kelompok 6 tiang *borpile*. Selanjutnya, untuk dinding geser arah x dibutuhkan 12 buah *bored pile* dengan *pile cap* sebesar 7000×2000, sedangkan dinding geser arah y dibutuhkan 10 buah *bored pile* dengan *pile cap* sebesar 5500×2000. Tebal *pile cap* seragam untuk seluruh titik yaitu 500 mm dengan dimensi balok pengikat yang digunakan sebesar 350/550.

Daftar Pustaka

- ACI 318-11 (2011), *Building Code Requirement for Structural Concrete*, American Concrete Institute, Michigan.
- ASCE/SEI 7-16 (2010), *Spesification for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction, Chicago.
- ATC-48 (1999), *Seismic Response of Concrete & Mansory Buildings ATC/SEAOC Joint Venture Training Curriculum*, Applied Technology Council, Redwood City.
- Bellier, O., Sbrier, M., Beaudouin, T., Villeneuve, M., Braucher, R., Bourles, D., Siame, L., Putranto, E., dan Pratomo, I. (2001), *High Slip Rate for a Low Seismicity along the Palu Koro Active Fault in Central Sulawesi (Indonesia)*, Blackwell Science Ltd., Terra Nova, 13, 463 –470..
- Dewobroto, W. (2013), *Komputer Rekayasa Struktur dengan SAP2000*, LUMINA Press dan Dapur Buku, Jakarta.
- Departemen Pekerjaan Umum (2006), *Pedoman Teknis Bangunan Tahan Gempa*, Jakarta.
- Farid, M. (2015). *Perencanaan Struktur Bangunan Tahan Gempa (Gaya Gempa dihitung dengan Menggunakan Metode Analisis Statik Ekuivalen*, Skripsi, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tadulako, Palu.
- FEMA 451B (2007). *NEHRP Recommended provisions for new building and other structures: Training and instructional materials Nationa Institutun of building sciences*, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
- Ghosh, S.K. and Fanella, D.A. (2013). *Seismic and Wind Design of Concrete Buildings*. International Code Council, Inc. Illinois.
- Hassoun, M. N., and Al-Manaseer, A. (2015). *Structural Concrete: Theory and Design*, 6 th edition. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia 2017*, Jakarta.
- McCormac, J. C. (2003), *Desain Beton Bertulang*, Jakarta
- Moehle, J. P., Hooper, J. D. and Lukbe, C. D. (2008). *Seismic Design of Reinforced Concrete Special Moment Frames: A Guide for Practicing Engineers. NEHRP Seismic Design Technical Brief No.1*, NIST GCR 16-917-40: Redwood City, California.
- Mowemba, Y.K. (2017). *Perencanaan Struktur Gedung Tahan Gempa dengan Ketidakberaturan Horizontal (Tipe Ketidakberaturan Sudut Dalam*, Skripsi, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tadulako, Palu.
- Nasution, T. (2011). *Modul Pengenalan SAP2000 Ver.7.42*, ITM, Medan.
- Pawirodikromo, W. (2012). *Seismologi Teknik & Rekayasa Kegempaan, Pustaka Pelajar*, Yogyakarta.
- Purwono, R. (2010). *Perencanaan Struktur Beton Bertulang Tahan Gempa: Sesuai SNI-1726 dan SNI-2847 Terbaru (Edisi Keempat)*, ITS Press, Surabaya.
- Puskim PU. (2011). *Desain Spektra Indonesia*, Diakses pada 10 Maret 2018 dari http://puskim.pu.go.id/Aplikasi/desain_spe_ktra_indonesia_2011/
- Rakhmat S. , R. (2015). *Seismic Isolation Untuk Bangunan Tinggi*. Diakses pada 6 Januari