

PERBANDINGAN RESPON STRUKTUR BANGUNAN BETON DENGAN PEMBEBANAN GRAVITASIONAL RENCANA TERHADAP PEMBEBANAN GRAVITASIONAL DAN GEMPA AKTUAL

Jusuf J. S. Pah¹ (yuserpbdaniel@yahoo.co.id)

Yuliyanti W. Oematan² (yuliyantiwelhelmina@gmail.com)

Judi K. Nasjono³ (judi.nasjono@staf.undana.ac.id)

Dantje A.T. Sina⁴ (dantjesina@staf.undana.ac.id)

ABSTRAK

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui perbandingan respon struktur bangunan beton yang hanya didesain terhadap pembebanan gravitasional tapi dibebani pembebanan gravitasional dan gempa aktual. Analisis struktur dilakukan atas sepuluh spesimen yang masing – masing dibebani kombinasi empat jenis pembebanan, untuk memperoleh respon struktur setiap spesimen berupa gaya dalam, lendutan, dan *drift*. Hasil analisis menyatakan bahwa beban gravitasional dan gempa aktual mulai signifikan sejak ketinggian 6,00 m (lantai ke-1). Beban gravitasional dan gempa aktual juga dapat berpengaruh sejak ketinggian 14,20 m (lantai ke-3), jika dilakukan perbesaran gaya geser sebesar 1,20 kali; lendutan sebesar 1,52 kali, dan *drift* sebesar 243,58 kali.

Kata Kunci : Respon Struktur, Bangunan Beton, BebanGravitasional, Beban Gempa, Gaya Dalam, Lendutan, Drift

ABSTRACT

The purpose of this study to compare structural response of a concrete bulding which was designed only in respect to gravitasional load but was loaded by actual gravitasional and seismic load. Structural analysis was carried out on ten specimens, each of which was subjected to four types of loading, to obtain the structural response of each specimen in the form of internal forces, deflections and drifts. Analysis result stated that the gravitational load and the actual earthquake began to take effect at a height of 6,00 m (on the 1st). The actual gravitational and seismic load, also have an effect to height 14,20 m (the 3rd floor), with a shear magnification was about 1,20 times; the deflection was about 1,52 times; the drift was about 243,58 times.

Keywords : Structure Response, Concrete Building Structure,, Gravitational Loads, Seismic Loads, Internal Force, Deflection, Drift

PENDAHULUAN

Kepadatan penduduk didaerah perkotaan yang semakin tinggi mengakibatkan lahan yang dibutuhkan untuk pembuatan gedung dengan bentuk horizontal sudah tidak memungkinkan, terutama jika bangunan gedung yang akan dibangun memiliki jumlah ruang yang banyak. Dengan demikian, di era moderen ini, pembangunan infrastruktur, terkhususnya bangunan beton dibangun secara vertikal/ke atas. Bangunan gedung yang dibangun ke atas disebut dengan bangunan bertingkat, yang terdiri atas bangunan bertingkat rendah (ketinggian < 20 m dan berlantai banyak), bangunan tingkat tinggi (ketinggian antara 20 – 40 m dan berlantai banyak), serta bangunan pencakar langit (ketinggian > 40 m dan berlantai banyak) (Mulyono, 2000). Dalam perencanaan bangunan bertingkat dapat digunakan bahan beton atau baja dengan beban

¹ Prodi Teknik Sipil, FST Undana;

² Prodi Teknik Sipil, FST Undana, (penulis korespondensi);

³ Prodi Teknik Sipil, FST Undana.

⁴ Prodi Teknik Sipil, FST Undana;

yang bekerja adalah beban gravitasional (searah gaya gravitasi) berupa beban mati (DL) dan beban hidup (LL) dan beban lateral (tegak lurus gaya gravitasi dan tinggi bangunan) berupa beban gempa (E) dan beban angin (W). Beban mati (DL) dan beban hidup (LL) merupakan beban gravitasional aktual, yaitu beban gravitasional sesungguhnya yang diterima oleh struktur. Sedangkan $1,2DL + 1,6LL$ merupakan beban gravitasional rencana, yaitu beban aktual yang dikalikan dengan faktor keamanan yang telah ditetapkan sehingga tidak terjadi kegagalan struktur ketika terjadi beban gravitasional berlebih. Selain itu, mengingat Indonesia merupakan negara yang rawan terhadap gempa, maka perhitungan beban gempa juga dilakukan sehingga ketika terjadi gempa, struktur dapat menerima dan tahan terhadap beban gempa yang bekerja. Beban gempa (E) adalah beban gempa aktual yang merupakan beban gempa sesungguhnya yang diterima oleh struktur dan diasumsikan berdasarkan standar perhitungan teori struktur. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui sejak ketinggian berapa beban gravitasional dan gempa aktual sudah mulai berpengaruh berdasarkan respon struktur bangunan beton ketika dibebani beban gravitasional rencana serta beban gravitasional dan gempa aktual.

TINJAUAN PUSTAKA

Pembebanan Pada Bangunan Tingkat Tinggi

Beban yang bekerja pada pada struktur bangunan adalah beban gravitasional berupa beban mati (berat sendiri struktur dan aksesoris pada bangunan), beban hidup (beban orang dan aksesoris atau benda yang dapat bergerak), beban hujan, salju dan es serta beban lateral (beban gempa dan beban angin) (Schueller, 1989).

Beban Mati (DL) Struktur Gedung

Beban mati (DL) yang berasal dari berat sendiri gedung termasuk dinding, sekat pemisah, balok, kolom, lantai, atap, mesin, dan peralatan yang merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari gedung (Suharjanto, 2013). Beban mati (DL) dalam penelitian ini merupakan beban mati sesungguhnya yang diterima oleh struktur, selanjutnya termasuk dalam beban gravitasional aktual.

$$DL \quad (1)$$

Beban Hidup (LL) Struktur Gedung

Beban hidup (LL) merupakan beban yang terjadi akibat pengunian atau penggunaan gedung tersebut, baik akibat beban yang berasal dari orang maupun dari barang yang dapat berpindah atau mesin dan peralatan serta komponen yang tidak merupakan bagian yang tidak tetap dari gedung (Suharjanto, 2013). Beban hidup (LL) dalam penelitian ini merupakan beban hidup sesungguhnya yang diterima oleh struktur, selanjutnya termasuk dalam beban gravitasional aktual.

$$LL \quad (2)$$

Beban Kombinasi

Beban kombinasi merupakan beban aktual struktur yang diberi faktor beban agar supaya agar supaya struktur dan komponen struktur memenuhi syarat kekuatan dan layak pakai terhadap macam – macam kombinasi beban (Suharjanto, 2013). Beban kombinasi yang digunakan dalam penelitian ini selanjutnya disebut sebagai beban gravitasional rencana, yaitu beban yang digunakan dalam perencanaan struktur. Kombinasi beban yang digunakan dalam penelitian ini adalah beban mati (DL) dan beban hidup (LL), sehingga persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$1,2DL + 1,6LL \quad (3)$$

Beban Gempa (E)

Perhitungan beban gempa (E) yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan metode statik ekuivalen berdasarkan SNI 1726:2012. Beban gempa (E) yang diperoleh selanjutnya disebut beban gempa aktual, yaitu beban gempa sesungguhnya yang diterima struktur ketika terjadi peristiwa gempa..

Gaya Gempa Lateral Ekuivalen (F_x)

Gaya gempa lateral ekuivalen ditentukan berdasarkan persamaan berikut.

$$F_x = C_{vx}V \quad (4)$$

dan

$$C_{vx} = \frac{w_x \cdot h_x^k}{\sum_{i=2}^n w_i \cdot h_i^k} \quad (5)$$

dengan

C_{vx} adalah faktor distribusi vertikal

V adalah gaya lateral desain total atau geser di dasar struktur (kN)

w_i dan w_x adalah bagian berat seismik efektif total struktur (W) yang ditempatkan pada tingkat i atau x

h_i dan h_x adalah tinggi dasar sampai tingkat i atau x (m)

k adalah eksponen yang terkait dengan perioda struktur, yaitu sebagai berikut :

untuk struktur yang mempunyai perioda $T \leq 0,5$; maka $k = 1$

untuk struktur yang mempunyai perioda $T \geq 2,5$; maka $k = 2$

untuk struktur yang mempunyai periode $0,5 \leq T < 2,5$; maka $k = 2$ atau ditentukan dengan interpolasi linier antara 1 dan 2

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode analisis, yaitu kajian secara analisis terhadap perbandingan respon struktur bangunan beton dengan pembebanan gravitasional rencana terhadap pembebanan gravitasional dan gempa aktual. Penelitian ini diawali dengan perhitungan pembebanan, yaitu pembebanan gravitasional rencana merupakan beban kombinasi (1,2DL+1,6LL), pembebanan gravitasional aktual merupakan beban mati nominal (DL) dan beban hidup (LL) serta beban gempa aktual (E). Empat jenis pembebanan yang diperoleh dimasukkan pada spesimen bangunan yang akan digunakan dalam penelitian, kemudian dianalisa menggunakan aplikasi SAP2000 v.19 untuk memperoleh gaya dalam, lendutan dan drift, selanjutnya dari output SAP tersebut dilakukan rekapan untuk memperoleh gaya dalam, lendutan dan drift maksimum. Penelitian ini dilakukan pada 10 spesimen bangunan bertingkat 2D dengan sepuluh variasi ketinggian dengan data sebagai berikut.

Luas = 20 × 20 m

Jumlah lantai = 1 – 10 lantai

Tinggi setiap lantai = 4,00 m

Model spesimen yang digunakan diberi nama FaDL-FaLL-FaE, dimana :

F = portal (frame)

a = jumlah tingkat

DL = beban mati (Dead Load)

LL = beban hidup (Live Load)

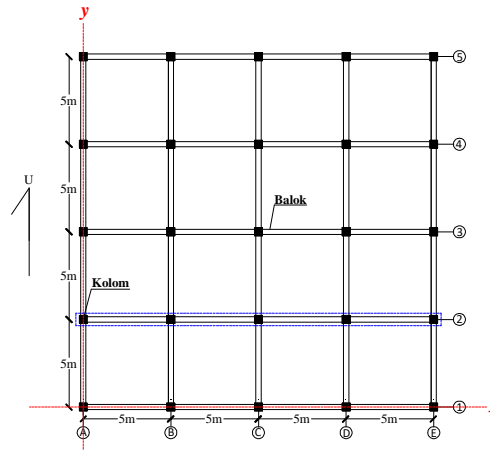
E = beban gempa (Earthquake)

Jumlah bentang arah x = 4 bentang

Jumlah bentang arah y = 4 bentang

Jarak setiap bentang = 5,00 m

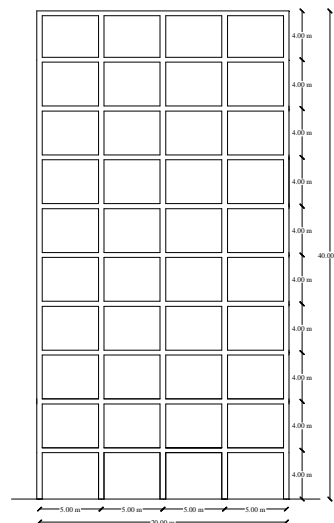
Jenis struktur bangunan = beton bertulang
 Dimensi kolom (b/h) =
 kolom 1 : 0,45 m / 0,45 m (45 cm / 45 cm)
 kolom 2 : 0,50 m / 0,50 m (50 cm / 50 cm)
 kolom 3 : 0,55 m / 0,55 m (55 cm / 55 cm)
 Dimensi balok (b/h) = 0,45 m / 0,45 m (40 cm / 40 cm)
 Tebal Plat (h) = 0,15 m (15 cm)
 Mutu beton ($f'c$) = 30 MPa
 Mutu baja tulangan (f_y) = 360 MPa
 Denah model bangunan dapat dilihat pada Gambar 1



Gambar 1. Denah bangunan

Spesimen yang digunakan dalam penelitian memiliki luasan, jumlah bentang arah x, jumlah bentang arah y, jenis struktur, dimensi struktur, serta mutu bahan (mutu beton dan mutu baja tulangan) yang sama namun tinggi setiap spesimen bangunan beton berbeda – bed, yaitu , spesimen 1 = 4m, spesimen 2 = 8 m, spesimen 3 = 12 m, spesimen 4 = 16 m, spesimen 5 = 20 m, spesimen 6 = 24m, spesimen 7 = 28m, spesimen 8 = 32m, spesimen 9 = 36m, spesimen 10 = 40m. Contoh spesimen yang ditampilkan adalah Gambar Spesimen 10, sedangkan Gambar Spesimen 1 sampai Spesimen 9 dapat dilihat pada Lampiran 1.

Spesimen 10 F10DL-F10LL-F10E (40 m)



Gambar 2. Spesimen 10 – F10DL-F10LL-F10E

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Untuk mengetahui perbandingan respon struktur bangunan beton dengan pembebanan gravitasional rencana terhadap pembebanan gravitasional dan gempa aktual, maka dilakukan analisa terhadap 10 spesimen bangunan beton dengan data bangunan seperti yang tercantum pada poin metode penelitian.

Pembebanan Gravitasional Aktual

Pembebanan gravitasional aktual terdiri atas beban mati (DL) dan beban hidup (LL), yaitu beban asli yang belum dikalikan dengan faktor keamanan atau faktor pengali.

(i). Beban Mati (1DL)

Penentuan beban didasarkan pada PPIUG 1983 yang terdiri atas 2 kelompok, yaitu berat sendiri bahan bangunan dan berat komponen gedung. Sesuai dengan jenis struktur yang digunakan dalam penelitian ini adalah struktur beton bertulang, maka berat jenis beton adalah 2400 kg/m^3 . Sedangkan untuk berat komponen gedung disesuaikan dengan komponen yang terdapat pada struktur yang digunakan dalam penelitian ini.

(ii). Beban Hidup (1LL)

Sesuai dengan PPIUG 1983, beban hidup yang bekerja pada atap bangunan berbeda dengan beban hidup yang bekerja pada lantai bangunan. Beban hidup pada atap serta pada struktur gedung (canopy) yang dapat dicapai dan dibebani oleh orang, harus diambil minimum sebesar 100 kg/m^2 bidang datar, sedangkan beban hidup pada lantai gedung sekolah, ruang kuliah, kantor, toko, toserba, restoran, hotel, asrama dan rumah sakit sebesar 250 kg/m^2 .

Pembebanan Gravitasional Rencana

Pembebanan gravitasional rencana merupakan beban kombinasi (1,2DL+1,6LL) berdasarkan SNI 2847:2013. Menurut pasal 11.2 SNI 2847: 2013, agar struktur dan komponen struktur memenuhi syarat kekuatan dan layak pakai terhadap bermacam – macam kombinasi beban, maka harus dipenuhi ketentuan dari kombinasi – kombinasi beban terfaktor. Berdasarkan hasil perhitungan beban mati dan beban hidup pada diatas, maka beban mati dan beban hidup tersebut akan dikalikan dengan faktor beban kemudian dijumlahkan (Persamaan 3). Untuk berat komponen gedung serta perhitungan beban mati, beban hidup dan beban kombinasi dapat dilihat pada Lampiran 2. Berikut Rekapitulasi beban gravitasional aktual (DL, LL) dan beban gravitasional rencana (1,2DL + 1,6LL) pada setiap spesimen.

Tabel 1. Rekapitulasi beban gravitasional aktual (DL, LL) dan beban gravitasional rencana (1,2DL + 1,6LL) pada setiap spesimen.

Spesimen	Beban Gravitasional Aktual		Beban Gravitasional Rencana	Berat Sendiri Kolom (kN)
	DL (kN/m)	LL (kN/m)	1,2DL+1,6LL (kN/m)	
1 Lantai 1 (Atap)	23,85	3,33	33,96	19,44
2 Lantai 1	28,65	8,33	47,72	24,00
Lantai 2 (Atap)	23,85	3,33	33,96	19,44
Lantai 1	28,65	8,33	47,72	29,04
Lantai 2	28,65	8,33	47,72	24,00
3 Lantai 3 (Atap)	23,85	3,33	33,96	19,44
Lantai 1	28,65	8,33	47,72	29,04
Lantai 2	28,65	8,33	47,72	24,00
4 Lantai 3 (Atap)	23,85	3,33	33,96	19,44
Lantai 1	28,65	8,33	47,72	29,04
Lantai 2	28,65	8,33	47,72	24,00
Lantai 3	28,65	8,33	47,72	24,00
5 Lantai 4 (Atap)	23,85	3,33	33,96	19,44
Lantai 1	28,65	8,33	47,72	29,04
Lantai 2	28,65	8,33	47,72	24,00
Lantai 3	28,65	8,33	47,72	24,00
Lantai 4	28,65	8,33	47,72	24,00
Lantai 5 (Atap)	23,85	3,33	33,96	19,44
Lantai 1	28,65	8,33	47,72	29,04
Lantai 2	28,65	8,33	47,72	24,00
Lantai 3	28,65	8,33	47,72	24,00
6 Lantai 4	28,65	8,33	47,72	24,00
Lantai 5	28,65	8,33	47,72	24,00
Lantai 6 (Atap)	23,85	3,33	33,96	19,44

Spesimen	Beban			Berat Sendiri Kolom (kN)	
	Gravitasional Aktual	LL (kN/m)	Beban Gravitasional Rencana 1.2DL+1.6LL (kN/m)		
7	Lantai 1	28,65	8,33	47,72	29,04
	Lantai 2	28,65	8,33	47,72	24,00
	Lantai 3	28,65	8,33	47,72	24,00
	Lantai 4	28,65	8,33	47,72	24,00
	Lantai 5	28,65	8,33	47,72	24,00
	Lantai 6	28,65	8,33	47,72	24,00
8	Lantai 7 (Atap)	23,85	3,33	33,96	19,44
	Lantai 1	28,65	8,33	47,72	29,04
	Lantai 2	28,65	8,33	47,72	24,00
	Lantai 3	28,65	8,33	47,72	24,00
	Lantai 4	28,65	8,33	47,72	24,00
	Lantai 5	28,65	8,33	47,72	24,00
9	Lantai 6	28,65	8,33	47,72	24,00
	Lantai 7	28,65	8,33	47,72	24,00
	Lantai 8	28,65	8,33	47,72	24,00
	Lantai 9 (Atap)	23,85	3,33	33,96	19,44
	Lantai 1	28,65	8,33	47,72	29,04
	Lantai 2	28,65	8,33	47,72	24,00
10	Lantai 3	28,65	8,33	47,72	24,00
	Lantai 4	28,65	8,33	47,72	24,00
	Lantai 5	28,65	8,33	47,72	24,00
	Lantai 6	28,65	8,33	47,72	24,00
	Lantai 7	28,65	8,33	47,72	24,00
	Lantai 8	28,65	8,33	47,72	24,00
	Lantai 9	28,65	8,33	47,72	24,00
	Lantai 10 (Atap)	23,85	3,33	33,96	19,44

Pembebanan Gempa Aktual

Analisa untuk memperoleh beban gempa dilakukan dengan metode statik ekuivalen, hal ini dilihat dari sifat struktur berupa gedung beraturan (SNI 1726:2012) dan dilakukan terhadap 10 spesimen bangunan beton dengan asumsi spesimen – spesimen tersebut berlokasi di Kota Kupang, yaitu pada garis lintang -10,182531 dan garis bujur 123,601254 dengan kondisi tanah sesuai data N-SPT (Lampiran 3), diklasifikasikan termasuk dalam kelas sedang (SD). Berdasarkan data koordinat dan hasil analisa aplikasi Desain Spektra Gempa Indonesia (Lampiran 4), maka diperoleh nilai parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek 0,2 detik (S_{DS}) adalah 0,78 g; parameter percepatan spektral desain untuk periode panjang 1 detik (S_{D1}) adalah 0,36 g; T_0 adalah 0,09 detik dan T_s adalah 0,46 detik. Kategori desain seismis ditentukan dengan Tabel 6 dan Tabel 7 SNI 1728:2012 berdasarkan nilai S_{DS} dan S_{D1} . Struktur bangunan yang akan dikaji berada pada kategori desain D. Selain itu, sistim struktur pada bangunan yang ditinjau adalah rangka beton pemikul momen khusus dengan koefisien R, adalah 8, C_d adalah 5,5 dan Ω_0 adalah 3 serta batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur hn (m)^c untuk kategori desain seismik D adalah tidak dibatasi (TB).

(i). Gaya Lateral Ekuivalen

Perhitungan gaya lateral ekuivalen dilakukan pada setiap spesimen, yang didahului dengan perhitungan berat per lantai yang mencakup beban mati, yaitu berat sendiri struktur pada setiap lantai dan beban mati tambahan pada setiap lantai serta beban hidup berdasarkan PPIUG 1983, dan untuk beban hidup hanya diambil 30% dari berat total. Setelah diperoleh berat sendiri per lantai pada setiap spesimen, selanjutnya dilakukan perhitungan gaya geser dasar seismik, yaitu berat seismik efektif (W) dikalikan dengan koefisien respon seismik (C_s), yang mana nilai C_s tidak boleh lebih besar dari C_{s-maks} dan tidak boleh lebih kecil dari C_{s-min} . Berdasarkan hasil perhitungan gaya geser dasar seismik, maka selanjutnya dilakukan perhitungan distribusi vertikal gaya gempa pada tiap lantai, yaitu dengan mengalikan faktor distribusi vertikal tiap lantai (C_{vx}) dengan gaya lateral desain total didasar struktur (V). Nilai C_{vx} ditentukan berdasarkan berat seismik efektif total struktur (W), tinggi dasar sampai tingkay i dan eksponen yang terkait dengan perioda struktur (k). Untuk nilai k pada setiap spesimen ditentukan berdasarkan perioda struktur, dimana untuk struktur dengan perioda $\leq 0,5$ detik nilai k adalah 1; untuk struktur dengan perioda $\geq 2,5$ detik nilai k adalah 2, dan untuk struktur dengan perioda antara 0,2 detik sampai 2,5 detik nilai k harus sebesar 2 atau

dilakukan interpolasi linier anatar 1 dan 2. Setelah diperoleh nilai F_x , maka dilakukan perhitungan distribusi gaya gempa pada tiap portal (P_1). Perhitungan beban gempa aktual dapat dilihat pada Lampiran 5. Berdasarkan hasil analisa statik ekuivalen yang dilakukan menurut SNI 1728:2012, diperoleh gaya gempa untuk setiap spesimen seperti pada tabel berikut.

Tabel 2. Gaya Lateral Ekuivalen pada Spesimen 1 sampai Spesimen 10

Spesimen	Lantai									
	Ke-0 (kN)	Ke-1 (kN)	Ke-2 (kN)	Ke-3 (kN)	Ke-4 (kN)	Ke-5 (kN)	Ke-6 (kN)	Ke-7 (kN)	Ke-8 (kN)	Ke-9 (kN)
1	131,24									
2	121,76	183,57								
3	69,02	132,07	160,79							
4	59,84	112,71	171,31	182,98						
5	22,58	48,89	80,62	114,96	120,15					
6	13,92	32,00	54,65	79,88	107,24	108,26				
7	8,83	21,52	38,04	56,98	77,95	100,70	99,24			
8	5,71	14,76	26,98	41,40	57,70	75,68	95,20	92,16		
9	3,75	10,26	19,40	30,48	43,27	57,62	73,40	90,53	86,45	
10	2,49	7,21	14,09	22,66	32,76	44,28	57,13	71,23	86,53	81,73

Analisa Data

Setelah dilakukan perhitungan beban gravitasional aktual (DL dan LL), beban gravitasional rencana (1,2DL + 1,6LL) dan beban gempa aktual (E), maka dilakukan analisa struktur menggunakan aplikasi SAP2000 v.14 untuk mengetahui gaya dalam yang bekerja pada setiap elemen struktur. Gaya dalam yang diambil dalam penelitian ini adalah momen tumpuan pada balok (jarak 0 m dan 5 m), momen lapangan pada balok (jarak 2,5 m), gaya geser tumpuan pada balok (jarak 0 m dan 5 m), lendutan pada balok serta *drift*. Dari gaya – gaya dalam tersebut, dilakukan rekapitulasi gaya dalam maksimum yang selanjutnya akan digunakan untuk menarik kesimpulan sesuai tujuan penelitian (Lampiran 7 – 10).

Rekapitulasi Momen Tumpuan Maksimum Pada Balok

Rekapan momen tumpuan maksimum pada balok akibat beban gravitasional aktual (1D, 1L); beban gravitasional rencana (1,2D+1,6L); dan beban gempa aktual (1E) dapat dilihat pada Tabel 3 dan Gambar 5 berikut.

Tabel 3. Rekapitulasi momen tumpuan maksimum pada balok

Tinggi Lantai (m)	Momen Balok (Tump.) Max			Jumlah	Momen Balok (Tump.) Max	Momen Balok (Tump.) Max - Abs
	1D (kNm)	1L (kNm)	1E (kNm)		1,2D + 1,6L (kNm)	1,2D + 1,6L (kNm)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	-56,99	-7,96	38,37	-26,57	-92,75	92,75
8	-63,24	-18,65	110,33	28,44	-105,75	105,75
12	-61,58	-18,04	135,38	55,75	-102,71	102,71
16	-61,05	-17,84	210,43	131,54	-101,83	101,83
20	-60,48	-17,68	180,95	102,79	-100,87	100,87
24	-73,75	-17,89	189,33	97,69	-103,83	103,83
28	-66,81	-18,99	198,78	112,98	-110,35	110,35
32	-70,98	-20,20	205,49	114,31	-117,41	117,41
36	-75,38	-21,40	210,49	113,70	-124,74	124,74
40	-79,93	-22,67	298,09	195,48	-132,22	132,22



Gambar 4. Grafik perbandingan momen tumpuan maksimum dan tinggi lantai akibat beban gravitasi rencana terhadap beban gravitasi aktual dan beban gempa aktual

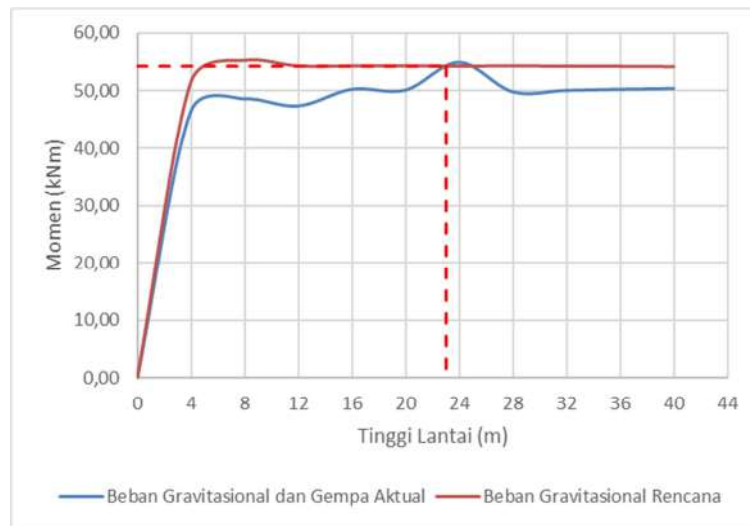
Pada Tabel 3 dan Gambar 4 menunjukkan bahwa berdasarkan momen tumpuan maksimum pada balok, beban gravitasi dan gempa aktual mulai melampaui beban gravitasi rencana sejak ketinggian 14,20 m (lantai ke-3) dengan besar momen tumpuan maksimum adalah 102,15 kNm.

Rekapitulasi Momen Lapangan Maksimum Pada Balok

Rekapan momen lapangan maksimum pada balok akibat beban gravitasi aktual (1D, 1L); beban gravitasi rencana (1,2D+1,6L); dan beban gempa aktual (1E) dapat dilihat pada Tabel 4 dan Gambar 5 berikut.

Tabel 4. Rekapitulasi momen lapangan maksimum pada balok

Tinggi Lantai (m)	Momen Balok (Lapangan) Max			Jumlah	Momen Balok (Tump.) Max
	1D (kNm)	1L (kNm)	1E (kNm)		1,2D + 1,6L (kNm)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	31,68	4,42	3,98	40,08	51,56
8	33,04	9,78	5,86	48,68	55,31
12	32,45	9,61	5,37	47,44	54,34
16	32,45	9,61	8,27	50,33	54,34
20	32,46	9,42	8,30	50,18	54,35
24	37,93	9,62	7,45	54,99	54,32
28	32,45	9,61	7,81	49,88	54,34
32	32,44	9,60	8,09	50,13	54,32
36	32,42	9,60	8,30	50,32	54,28
40	32,39	9,60	11,79	53,77	54,23



Gambar 5. Grafik hubungan momen lapangan maksimum dan tinggi lantai akibat beban gravitasiional dan gempa aktual terhadap beban gravitasiional rencana

Berdasarkan Tabel 4 dan Gambar 5, yaitu rekapitulasi momen lapangan maksimum pada balok, maka beban gravitasiional dan gempa aktual mulai melampaui beban gravitasiional rencana sejak ketinggian 23,00 m (Lantai ke-5) dengan momen lapangan maksimum pada balok sebesar 54,25 kNm.

Rekapitulasi Gaya Geser Tumpuan Maksimum Pada Balok

Rekapan gaya geser tumpuan maksimum pada balok akibat beban gravitasiional aktual (1D, 1L); beban gravitasiional rencana (1,2D+1,6L); dan beban gempa aktual (1E) dapat dilihat pada Tabel 5 dan Gambar 6 berikut.

Berdasarkan Tabel 5 dan Gambar 6, yaitu gaya geser tumpuan maksimum pada balok, maka beban gravitasiional dan gempa aktual mulai melampaui beban gravitasiional rencana sejak ketinggian 6,40 m (Lantai ke-1) dengan momen lapangan maksimum pada balok sebesar 122 kN.

Tabel 5. Rekapitulasi gaya geser tumpuan maksimum pada balok

Tinggi Lantai (m)	G. Geser Balok (Tump.) Max			Jumlah	G. Geser Balok (Tump.) Max
	1D (kN)	1L (kN)	1E (kN)		1,2D + 1,6L (kN)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	65,28	9,11	13,76	88,15	106,25
8	74,33	21,78	41,79	137,90	124,08
12	73,38	21,47	52,08	146,93	122,26
16	73,18	21,31	80,86	175,35	121,94
20	72,94	21,25	72,39	166,58	121,55
24	86,56	21,32	72,76	180,63	122,71
28	75,52	21,76	76,38	173,66	125,33
32	77,18	22,07	78,96	178,21	128,16
36	78,91	22,72	80,88	182,51	142,15
40	80,72	23,23	114,52	218,47	134,07



Gambar 6. Grafik hubungan geser tumpuan maksimum pada balok akibat beban gravitasiional dan gempa aktual terhadap beban gravitasiional rencana

Rekapitulasi Lendutan Maksimum Pada Balok

Rekapan lendutan maksimum pada balok akibat beban gravitasiional aktual (1D, 1L); beban gravitasiional rencana (1,2D+1,6L); dan beban gempa aktual (1E) dapat dilihat pada Tabel 6 dan Gambar 7 berikut.

Tabel 6. Rekapitulasi gaya geser tumpuan maksimum pada balok

Tinggi Lantai (m)	Lend. Balok Max			Jumlah	Lend. Balok Max 1,2D + 1,6L (m)
	1D (m)	1L (m)	1E (m)		
0	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00
4	0,00067	0,00009	0,00003	0,00079	0,00109
8	0,00064	0,00019	0,00061	0,00143	0,00105
12	0,00064	0,00018	0,00071	0,00153	0,00101
16	0,00065	0,00018	0,00111	0,00194	0,00101
20	0,00060	0,00017	0,00097	0,00174	0,00101
24	0,00079	0,00002	0,00100	0,00180	0,00101
28	0,00066	0,00018	0,00845	0,00929	0,00010
32	0,00066	0,00018	0,00108	0,00193	0,00101
36	0,00067	0,00018	0,00111	0,00196	0,00101
40	0,00067	0,00018	0,00157	0,00242	0,00102



Gambar 7. Grafik hubungan lendutan maksimum dan tinggi lantai akibat beban gravitasiional dan gempa aktual dan beban gravitasiional rencana

Pada Tabel 6 dan Gambar 7 menunjukkan bahwa berdasarkan lendutan pada balok, beban gravitasional dan gempa aktual mulai melampaui beban gravitasional rencana sejak ketinggian 6,00 m (lantai ke-1) dengan lendutan sebesar 0,00113 m.

Berdasarkan pembahasan diatas, rekapitulasi tinggi struktur dan lantai yang pada ketinggian dan lantai tersebut mulai terjadi perpotongan gaya dalam pada grafik, dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Rekapitulasi tinggi struktur pada saat respon struktur akibat beban gempa aktual lebih besar dari respon struktur akibat beban gravitasional rencana.

Respon Struktur	Tinggi struktur pada saat respon struktur akibat beban gravitasional dan gempa aktual mulai melampaui respon struktur akibat beban gravitasional rencana.	
	(m)	Lantai
M _{Tumpuan}	14,20	3
M _{Lapangan}	23,00	5
V _{Tumpuan}	6,40	1
Lendutan Maksimum	6,00	1

Berdasarkan Tabel 7, beban gravitasional dan gempa aktual mulai berpengaruh sejak ketinggian minimum 6,00 m atau sejak lantai ke-1, akan tetapi beban gravitasional dan gempa aktual dapat juga mulai berpengaruh sejak pada lantai ke-3 jika lendutan dan gaya geser akibat beban gravitasional rencana diperbesar. Berdasarkan Tabel 5, jika beban gravitasional dan gempa aktual mulai berpengaruh sejak lantai ke-3, jika dilakukan perbesaran gaya geser akibat beban gravitasional rencana sebesar :

$$\frac{146,93}{122,26} = 1,20 \text{ kali}$$

Berdasarkan Tabel 6, beban gravitasional dan gempa aktual mulai berpengaruh sejak lantai ke-3, jika dilakukan perbesaran lendutan akibat beban gravitasional rencana sebesar :

$$\frac{0,00153}{0,00101} = 1,37 \text{ kali}$$

Rekapitulasi Drift Maksimum

Rekapan drift maksimum akibat beban gravitasional aktual (1D, 1L); beban gravitasional rencana (1,2D+1,6L); dan beban gempa aktual (1E) dapat dilihat pada Tabel 8 dan Gambar 8 berikut.

Tabel 8. Rekapitulasi drift maksimum

Tinggi Lantai (m)	Drift Max			Jumlah	Drift Max 1,2D + 1,6L (m)
	1D (m)	1L (m)	1E (m)		
0	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
4	0,0000190	0,0000026	0,0002410	0,0002626	0,0000310
8	0,0000460	0,0000079	0,0103160	0,0103699	0,0000720
12	0,0000730	0,0000132	0,0274380	0,0275242	0,0001130
16	0,0001340	0,0000191	0,0621430	0,0622961	0,0001570
20	0,0001340	0,0000277	0,0974330	0,0975947	0,0002050
24	0,0001750	0,0000285	0,1409460	0,1411495	0,0002580
28	0,0002120	0,0000365	0,1943740	0,1946225	0,0002638
32	0,0002530	0,0000454	0,2582240	0,2585224	0,0003268
36	0,0002970	0,0000464	0,3329950	0,3333384	0,0003958
40	0,0003450	0,0000574	0,4499060	0,4503084	0,0004708



Gambar 8. Grafik hubungan simpangan per lantai dan tinggi lantai akibat beban gravitasi dan gempa aktual terhadap beban gravitasi rencana pada setiap spesimen

Berdasarkan Tabel 8 dan Gambar 8, sejak ketinggian 4,00 m sampai 40 m beban gravitasi dan beban gempa aktual serta beban gravitasi rencana tidak mengalami perpotongan, namun semakin tinggi bangunan, *drift* yang terjadi semakin besar sehingga berdasarkan *drift* beban gravitasi dan gempa aktual sudah harus ditinjau sejak pada lantai ke-1. Beban gravitasi dan gempa aktual juga dapat ditinjau sejak ketinggian 12 m atau pada lantai ke-3, dengan dilakukan perbesaran *drift* untuk beban gravitasi sebesar :

$$\frac{0,02752}{0,00011} = 243,58 \text{ kali}$$

KESIMPULAN

1. Respon struktur pada bangunan berupa momen tumpuan pada balok, beban gravitasi dan gempa aktual mulai melampaui beban gravitasi rencana sejak ketinggian 14,2 m atau pada lantai ke-3 sebesar 102,15 kNm.
2. Respon struktur pada bangunan berupa momen lapangan pada balok, beban gravitasi dan gempa aktual mulai melampaui beban gravitasi rencana sejak ketinggian 23,00 m atau pada lantai ke-5 sebesar 54,25 kNm.
3. Respon struktur pada bangunan berupa gaya geser tumpuan pada balok, beban gravitasi dan gempa aktual mulai melampaui beban gravitasi rencana sejak ketinggian 6,40 m atau pada lantai ke-1 sebesar 122 kN.
4. Respon struktur pada bangunan berupa lendutan maksimum pada balok, beban gravitasi dan gempa aktual mulai melampaui beban gravitasi rencana sejak ketinggian 6,00 m atau pada lantai ke-1 sebesar 0,00113 m.
5. Respon struktur *drift*, sejak ketinggian 4,00 m beban gravitasi dan gempa aktual telah melampaui beban gravitasi rencana, dan semakin tinggi bangunan *drift*, yang dihasilkan juga semakin besar.
6. Dari keseluruhan hasil rekapan respon struktur maksimum maka, beban gravitasi dan gempa aktual mulai berpengaruh sejak ketinggian 6,00 m atau lantai ke-1.
7. Beban gravitasi dan gempa aktual juga dapat mulai berpengaruh sejak ketinggian 14,20 m atau pada lantai ke-3, jika pada beban gravitasi rencana dilakukan perbesaran drift

sebesar 243,58 kali; perbesaran gaya geser sebesar 1,20 kali dan perbesaran lendutan sebesar 1,37 kali.

Daftar Pustaka

- Mulyono. (2000). *Petunjuk Standarisasi Desain Gedung Bertingkat*. Bandung: Ganesha Exact.
- Nasional, B. S. (2002). Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung. In S. -1. 2002. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Nasional, B. S. (2013). *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- PPIUG. (1983). *Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung*. Bandung: Stensil.
- PU, K. (2019). *Desain Spektra Indonesia*. Diambil dari http://puskim.go.id/Aplikasi/desain_spektra_gempa_indonesia_2011/.
- Schueller, W. (1989). High Rise Bulding Structures. In W. Schueller, & T. Surjaman (Ed.), *Struktur Bangunan Bertingkat Tinggi* (J. Hakim, Trans.). Bandung: PT.Eresco.
- Sugito. (2015). *Modul SAP2000 15.0 Analisis 3D statik dan Dinamik*. (https://www.academia.edu/30097325/Modul_SAP_Dengan_Tutorial_Bahasa_Indonesia).
- Suharjanto. (2013). Rekayasa Gempa. In Suharjanto, *Rekayasa Gempa*. Yogyakarta: Kepel. Press.
- Suparman. (2015). *Penyelidikan Tanah Kampus Undana*. Kupang: UKPBJ/ULP.

Lampiran 1 : Gambar Spesimen 1 sampai Spesimen 9

https://drive.google.com/file/d/1qh4MnQeon4lH_Rem7F1eINNYsuHDcfn/view?usp=drivesdk

Lampiran 2 : Perhitungan beban gravitasional rencana dan aktual

https://drive.google.com/file/d/1qpsM_2qGLV9lBkawxPjFZJ0c2WD3xYwO/view?usp=drivesdk

Lampiran 3 : Data Log-Bor N-SPT

<https://drive.google.com/file/d/1qsg6JNJ-RGXoCO9C31otc-NopOyaOr-P/view?usp=drivesdk>

Lampiran 4 : Hasil analisa aplikasi desain spektra Indonesia

https://drive.google.com/file/d/1qvBwz5fBu2ZM6JHUyTd_kY9lQgNTEUiK/view?usp=drivesdk

Lampiran 5 : Perhitungan beban gempa aktual

<https://drive.google.com/file/d/1r6EFsj53Vih5SNPBmRnZvx7LegRyMJAR/view?usp=drivesdk>

Lampiran 6 : Pemodelan Struktur

https://drive.google.com/file/d/1rCgAnCvoPvLrAw505-27HqzeeVwd_Juw/view?usp=drivesdk

Lampiran 7 : Hasil analisa SAP2000 v.14 untuk beban 1D

https://drive.google.com/file/d/1iXQXZF_j68z2J1vouTOyoiAeWCuZnEAF/view?usp=drivesdk

Lampiran 8 : Hasil analisa SAP2000 v.14 untuk beban 1L

https://drive.google.com/file/d/1iaFCa-KECRft_mYqgUevCbohJHnyNEQY/view?usp=drivesdk

Lampiran 9 : Hasil analisa SAP2000 v.14 untuk beban 1E

https://drive.google.com/file/d/1iaS8XXLW9iJm0Ht58dT1xngkcr6IB_7d/view?usp=drivesdk

Lampiran 10 : Hasil analisa SAP2000 v.14 untuk beban 1,2DL+1,6LL

https://drive.google.com/file/d/1ib1OWkhsGByz9pZJJeaBcI4tIW6G_46E/view?usp=drivesdk