

Analisis Respons dan Kinerja Struktur Bangunan Gedung Menggunakan *Pushover Analysis*

Analysis of Response and performance of Building Structures Using Pushover Analysis

Arie Putra Usman¹, Rosidawani^{1*}, Sri Palta Mutmainna¹

¹ Teknik Sipil, Universitas Sriwijaya, Jl. Raya Palembang-Prabumulih KM 32, Palembang, Indonesia

* Penulis korespondensi : rosidawani@ft.unsri.ac.id

Tel.: +62-8127889319; fax: -

Diterima: 28 Agustus 2021; Direvisi: 31 Oktober 2021; Disetujui: 31 Oktober 2021

DOI: 10.25299/saintis2021.vol21(02).7585

Abstrak

Indonesia merupakan negara dengan resiko gempa tinggi, hal ini diakibatkan oleh pertemuan lempeng-lempeng tektonik utama dan lempeng kecil lainnya yang mengelilingi Indonesia. Setiap wilayah Indonesia memiliki tingkat resiko gempa yang berbeda-beda, mulai dari resiko gempa rendah hingga resiko gempa tinggi. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui perbandingan respons dan kinerja struktur suatu bangunan gedung di beberapa wilayah yang mewakili tingkat resiko gempa rendah hingga tinggi. Adapun wilayah-wilayah yang ditinjau dalam penelitian ini yaitu wilayah Pontianak, Palembang, Jakarta, Bandar Lampung, dan Palu. Analisis dilakukan pada bangunan beton bertulang empat lantai dengan dinding geser menggunakan bantuan program SAP 2000 guna mendapatkan respons dan kinerja struktur. Hasil respons struktur dari penelitian menunjukkan nilai simpangan lateral lantai dari yang terbesar hingga terkecil yaitu dimulai dari wilayah Palu, Bandar Lampung, Jakarta, Palembang, dan Pontianak. Wilayah Palu memiliki nilai simpangan lateral lantai yang terbesar yaitu 23,745 mm dan 23,690 mm untuk arah X dan Y sedangkan wilayah Pontianak memiliki nilai simpangan lateral lantai terkecil dengan besar simpangan lateral 7,571 mm dan 7,439 mm untuk arah X dan Y. Berdasarkan analisis *pushover* didapatkan level kinerja struktur memiliki level kinerja B untuk Wilayah Palu dan IO untuk wilayah lainnya.

Kata Kunci: Gempa, Level Kinerja, Respons Struktur, *Pushover Analysis*

Abstract

Indonesia is a country with a high risk of earthquake due to the meeting of the main tectonic plates and other small plates that surround Indonesia. Each area in this country has a different level of earthquake risk, ranging from low to high earthquake risk. This study aims to compare the response and structural performance of buildings in some areas with low to high earthquake risk levels. The areas covered Pontianak, Palembang, Jakarta, Bandar Lampung, and Palu. The analysis was carried out on a four-story reinforced concrete with shear walls using the SAP 2000 program to obtain the response and performance of the building structure. The results of the structural response showed the value of the floor lateral deviation from the largest to the smallest, starting from Palu, Bandar Lampung, Jakarta, Palembang, and Pontianak. Palu has the largest floor lateral deviation values of 23.745 mm and 23.690 mm for the X and Y directions, while Pontianak has the smallest floor lateral deviation values of 7.571 mm and 7.439 mm for the X and Y directions. Based on the *pushover* analysis, the structure has a performance level of B for Palu areas and IO for other areas.

Keywords: Earthquake, Performance Level, Structure Response, *Pushover Analysis*

PENDAHULUAN

Wilayah Indonesia memiliki potensi terjadinya gempa yang bervariasi, mulai dari potensi gempa rendah sampai dengan tinggi. Dampak dari gempa itu sendiri mengakibatkan adanya kerusakan pada gedung, jembatan, jalan, rumah, dan lain-lain. Perencanaan suatu struktur bangunan tersebut perlu dilakukan sebaik mungkin agar dapat meminimalisir dampak akibat terjadinya gempa.

Salah satu faktor yang memengaruhi struktur dalam menerima beban yaitu konfigurasi struktur, dimana bangunan yang berkonfigurasi teratur lebih baik dalam menahan gaya gempa sehingga kerusakan struktur dapat dihindari [1][2]. Selain itu, besarnya gaya gempa juga memengaruhi

respons struktur yang terjadi diakibatkan karena gaya gempa akan diterima oleh dasar bangunan [3][4]. Dari gaya gempa yang diberikan pada struktur, dapat ditentukan respons dan kinerja struktur pada setiap wilayah Indonesia yang mewakili wilayah dengan resiko gempa rendah sampai dengan tinggi. Peraturan yang digunakan dalam perhitungan gempa yaitu SNI 1726-2019 [5], dimana dalam peraturan tersebut terdapat nilai koefisien gempa yang digunakan dalam perencanaan struktur. Penelitian ini mengambil wilayah Pontianak, Palembang, Jakarta, Bandar Lampung, dan Palu sebagai beberapa contoh wilayah yang ada di Indonesia yang mewakili wilayah dengan gempa rendah hingga tinggi. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk menganalisis respons dan kinerja struktur pada bangunan beton

bertulang di beberapa wilayah berbeda berdasarkan peraturan SNI 1726:2019 dan metode FEMA 440.

METODOLOGI

Perhitungan respons dan kinerja struktur dilakukan di beberapa wilayah di Indonesia dengan data-data mengenai bangunan beton bertulang yang ditinjau yaitu:

- Fungsi gedung = Rumah Sakit 4 Lantai
- Tinggi lantai 1 = 4,5 m
- Tinggi lantai 2-atap = 4,2 m
- Panjang = 36 m
- Lebar = 43,2 m
- Mutu beton = 35 MPa
- Mutu baja = 400 MPa

Tahapan dalam penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.

Studi Pustaka

Penelitian ini dimulai dengan melakukan pengumpulan informasi yang berhubungan dengan topik penelitian melalui studi literatur. Peraturan-peraturan yang digunakan untuk mendasari perhitungan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Peraturan-Peraturan yang Digunakan

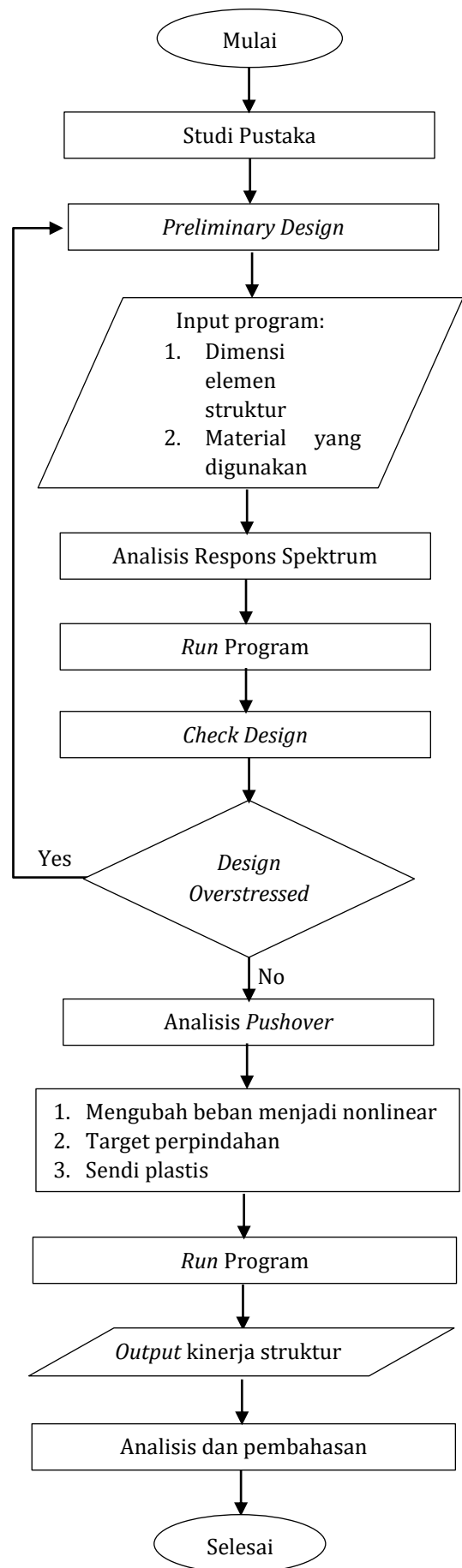
Perhitungan	Peraturan
Pembebanan	SNI 1727:2020
Beban Gempa	SNI 1726:2019
Beton Bertulang	SNI 1727:2019
Kinerja Struktur	FEMA 440

Preliminary Design

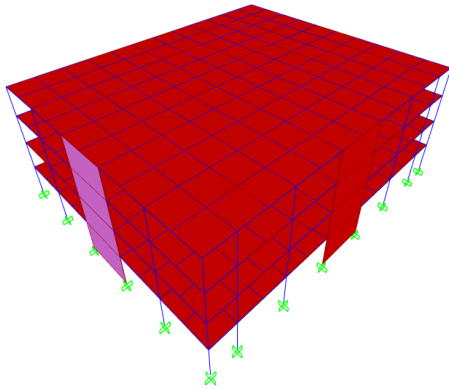
Preliminary design merupakan perencanaan dimensi elemen struktur yang meliputi balok, kolom, pelat lantai, dan dinding geser yang mengacu pada SNI 2847:2019. Hasil perencanaan yang didapat kemudian dimodelkan dengan program SAP 2000 sesuai pada data-data yang sudah didapat dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. *Define grid data*, dilakukan untuk mempermudah dalam mengaplikasikan elemen struktur yang akan digambarkan.
2. *Define material*, dilakukan guna memasukkan data material agar sesuai dengan spesifikasi material yang telah ditentukan.
3. *Define* elemen struktur, dilakukan guna menggambarkan elemen struktur berupa balok, kolom, pelat lantai, dan dinding geser mulai dari dimensi, tulangan, dan juga mutu material yang digunakan.

Struktur yang telah dimodelkan dengan program SAP 2000 dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 2. Model Struktur yang Digunakan

Input Data Struktur

Tahapan input data struktur dilakukan setelah pemodelan, dimana pada tahapan ini dilakukan input data-data struktur yang diperlukan antara lain data dimensi elemen struktur, data material elemen struktur dan data beban yang digunakan. Beban-beban yang telah diinput akan diterima oleh struktur bangunan gedung sehingga kemudian dihasilkan respons dan kinerja struktur dari gedung tersebut. Pembebanan yang dilakukan meliputi beban mati, beban hidup, dan beban gempa. Beban mati ditentukan berdasarkan PPPURG 1987 dan SNI 1727:2020 [6], beban hidup dan gempa ditentukan berdasarkan SNI 1727:2020 dan SNI 1726:2019. Beban mati terdiri dari berat seluruh bahan konstruksi bangunan gedung yang terpasang [7]. Untuk beban hidup merupakan beban yang diakibatkan oleh pengguna dan penghuni bangunan gedung [6] sedangkan beban gempa merupakan beban yang perlu dianalisis dengan baik karena besaran dan waktu terjadinya gempa cukup sulit untuk diprediksi [8]. Dalam menghitung beban gempa, dibutuhkan koefisien kegempaan pada setiap wilayah yang diperoleh dari *website* PU Cipta Karya. Koefisien kegempaan ini diperlukan untuk menghitung parameter-parameter kegempaan yang digunakan untuk menggambarkan kurva respons spektrum. Koefisien kegempaan pada setiap wilayah yang ditinjau disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Koefisien Kegempaan

No.	Wilayah	Kelas Situs	S_s	S_1
1.	Pontianak	Tanah Lunak (SE)	0,1756	0,0510
2.	Palembang	Tanah Lunak (SE)	0,2909	0,2485
3.	Jakarta	Tanah Lunak (SE)	0,7806	0,3823
4.	B.Lampung	Tanah Lunak (SE)	0,8739	0,4306
5.	Palu	Tanah Lunak (SE)	1,5000	0,6000

Selanjutnya, beban-beban yang digunakan tersebut dikombinasikan dari setiap kemungkinan yang terjadi berdasarkan peraturan SNI 1726:2019. Berikut kombinasi pembebanan yang digunakan:

1. 1,4 DL
2. 1,2 DL + 1,6 LL
3. 1,2 DL + 1 LL + 1,3 RX1 + 0,39 RY0
4. 1,2 DL + 1 LL + 1,3 RX1 - 0,39 RY0
5. 1,2 DL + 1 LL - 1,3 RX1 + 0,39 RY0
6. 1,2 DL + 1 LL - 1,3 RX1 - 0,39 RY0
7. 1,2 DL + 1 LL + 0,39 RX0 + 1,3 RY1
8. 1,2 DL + 1 LL + 0,39 RX0 - 1,3 RY1
9. 1,2 DL + 1 LL - 0,39 RX0 + 1,3 RY1
10. 1,2 DL + 1 LL - 0,39 RX0 - 1,3 RY1
11. 0,9 DL + 1,3 RX1 + 0,39 RY0
12. 0,9 DL + 1,3 RX1 - 0,39 RY0
13. 0,9 DL - 1,3 RX1 + 0,39 RY0
14. 0,9 DL - 1,3 RX1 - 0,39 RY0
15. 0,9 DL + 0,39 RX0 + 1,3 RY1
16. 0,9 DL + 0,39 RX0 - 1,3 RY1
17. 0,9 DL - 0,39 RX0 + 1,3 RY1
18. 0,9 DL - 0,39 RX0 - 1,3 RY1

Analisis Linear dan Non-linear

Tahapan analisis dilakukan setelah pemodelan dan pembebanan pada bangunan yang ditinjau pada setiap wilayahnya. Terdapat dua tahap analisis yang dilakukan, yang pertama yaitu analisis linear (analisis respons spektrum) dan yang kedua yaitu analisis non-linear (analisis *pushover*).

Pada analisis linear dilakukan perhitungan gaya geser dasar dan perhitungan simpangan antar lantai untuk mengetahui aman atau tidaknya struktur yang digunakan. Perhitungan gaya geser dasar mengacu pada peraturan SNI 1726:2019, dimana terdapat koefisien-koefisien yang ditentukan dalam menghitung gaya geser dasar. Adapun langkah-langkah dalam menghitung gaya geser dasar seismik yaitu sebagai berikut:

1. Menentukan kategori resiko gedung yang dapat dilihat pada tabel 3 SNI 1726:2019.
2. Menentukan kategori desain seismik pada masing-masing wilayah berdasarkan tabel 8 dan 9 SNI 1726:2019.
3. Menentukan faktor reduksi berdasarkan tabel 12 SNI 1726:2019 yang hasilnya yaitu:
 $R = 8; \Omega_0 = 3; C_d = 5,5$.
4. Menentukan periode fundamental, dimana persamaannya sebagai berikut:

$$T_a \leq T_x \leq C_u T_a$$

$$C_t \times h_n^x \leq T_x \leq C_u T_a \quad (1)$$

Nilai T_x harus lebih kecil dari $C_u T_a$, apabila T_x lebih besar dari $C_u T_a$ maka nilai T yang digunakan sebesar $C_u T_a$.

5. Menentukan koefisien desain seismik (C_s) berdasarkan pasal 7.8.1.1. SNI 1726:2019.

$$C_{s \min} \leq C_s \leq C_{s \max}$$

$$0,44 S_{DS} \times I_e \leq C_s \leq \frac{S_{D1}}{T \left(\frac{R}{I_e} \right)} \quad (2)$$

Nilai C_s harus lebih kecil dari $C_{s \max}$, apabila C_s lebih besar dari $C_{s \max}$ maka nilai C_s yang digunakan sebesar $C_{s \max}$.

6. Menentukan gaya geser dasar seismik dengan persamaan sebagai berikut:

$$V = C_s \times W \quad (3)$$

$$W = \text{Berat Sendiri Struktur} + \text{Beban Mati} + 30\% \text{ Beban Hidup} \quad (4)$$

Analisis linear yaitu perhitungan simpangan antar lantai. Dalam menghitung nilai simpangan antar lantai, dibutuhkan nilai simpangan lateral yang diakibatkan oleh beban gempa yang diberikan. Nilai simpangan lateral dapat ditampilkan melalui program SAP 2000 yang selanjutnya nilai tersebut dimasukkan dalam perhitungan simpangan antar lantai. Simpangan antar lantai dihitung berdasarkan pasal 7.8.6. SNI 1726:2019. Simpangan antar lantai itu sendiri merupakan simpangan yang terjadi pada pusat masa yang berada di atas atau di bawah lantai yang ditinjau. Berikut langkah-langkah perhitungan simpangan antar lantai:

1. Menentukan nilai C_d , I_e , dan h_{sx} .
2. Menampilkan simpangan lateral (δ_e)
3. Menghitung simpangan yang diperbesar dengan rumus sebagai berikut:

$$\delta_1 = \frac{C_d \times \delta_e}{I_e} \quad (5)$$

4. Menentukan simpangan antar lantai izin, dimana perhitungan yang digunakan berdasarkan tabel 20 SNI 1726:2019 yang ditentukan oleh jenis struktur dan kategori resiko. Dalam penelitian ini, bangunan yang digunakan termasuk dalam kategori resiko IV dan didapat perhitungan sebagai berikut:

$$\Delta_{izin} = 0,015 h_{sx} \quad (6)$$

5. Menghitung simpangan antar lantai, dimana nilainya tidak boleh melebihi dari simpangan antar lantai izin.

Untuk lantai dasar:

$$\Delta_1 = \delta_1 \leq \Delta_{izin} \quad (7)$$

Untuk lantai 2 dan seterusnya:

$$\Delta_2 = (\delta_{e2} - \delta_{e1}) C_d / I_E \leq \Delta_{izin} \quad (8)$$

6. Apabila simpangan yang simpangan antar lantai (Δ_i) lebih kecil dari simpangan antar lantai izin (Δ_{izin}), maka struktur dapat dikategorikan aman. Namun apabila simpangan antar lantai (Δ_i) lebih besar dari simpangan antar lantai izin (Δ_{izin}), maka struktur dapat dikategorikan tidak aman karena keadaan struktur mengalami keruntuhan.

Bangunan yang sudah dinyatakan aman, berdasarkan analisis linear kemudian akan dianalisis secara non-linear (*Pushover Analysis*). Analisis ini menjadi penting karena pada saat gempa besar terjadi, beberapa elemen struktur seperti balok dan kolom akan mengalami pelelehan sendi plastis [9].

Analisis *pushover* dilakukan dengan cara memberikan beban statis secara bertahap hingga struktur tersebut mengalami keruntuhan. Penempatan beban pada analisis ini dilakukan secara horizontal yang merupakan kombinasi dari beban gempa, beban hidup dan beban mati [10].

Dalam penelitian ini, perhitungan analisis *pushover* dilakukan berdasarkan metode FEMA 440

[11]. Metode FEMA 440 merupakan pengembangan dari FEMA 356 (metode koefisien perpindahan) [12]. Prosedur perhitungan FEMA 440 dimulai dengan menentukan waktu getar efektif (T_e) [12]. Untuk mengetahui nilai waktu getar alami suatu struktur, diperlukan nilai waktu getar efektif dari kurva *pushover* [13]. Penyelesaian ini dilakukan dengan cara modifikasi respon elastis sistem *single degree of freedom* ekuivalen dengan faktor-faktor koefisien C_0 , C_1 , C_2 , dan C_3 sehingga didapatkan nilai terbesar perpindahan global baik dalam kondisi elastis maupun inelastis yang disebut dengan target perpindahan (δ_T) [12]. Adapun rumus yang digunakan dalam menentukan target perpindahan (δ_T) yaitu sebagai berikut:

$$\delta_T = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4 \pi^2} g \quad (9)$$

HASIL DAN DISKUSI

Hasil Perhitungan Volume Elemen Struktur

Dari hasil perencanaan dimensi elemen struktur balok, kolom, pelat lantai, dan dinding geser, didapat dimensi elemen struktur seperti disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Dimensi Elemen Struktur

Wilayah	B1 (mm)		B2 (mm)		BA (mm)	
	h	b	h	b	h	b
Pontianak	500	300	500	250	400	200
Palembang	600	300	500	250	400	200
Jakarta	600	400	500	250	400	200
Bandar Lampung	700	350	500	300	400	200
Palu	700	400	500	300	400	200

Tabel 3. Dimensi Elemen Struktur (Lanjutan)

Wilayah	K (mm)		SW (mm)	P (mm)
	h	b		
Pontianak	500	500	300	120
Palembang	500	500	300	120
Jakarta	500	500	300	120
Bandar Lampung	500	500	300	120
Palu	500	500	300	120

Dari hasil perencanaan dimensi elemen struktur yang didapat, maka dapat dihitung volume elemen struktur pada masing-masing wilayah. Nilai-nilai volume elemen truktur tersebut dapat dilihat pada Tabel 4, dimana wilayah Palu memiliki nilai terkecil dengan persen perbedaan sebesar 11,30%.

Tabel 4. Volume Elemen Struktur

Wilayah	Volume Elemen Struktur (m ³)	
	Total	% Perbedaan Total Volume
Pontianak	1476,22	0
Palembang	1509,05	2,22
Jakarta	1574,71	6,67
Bandar Lampung	1604,66	8,70
Palu	1642,97	11,30

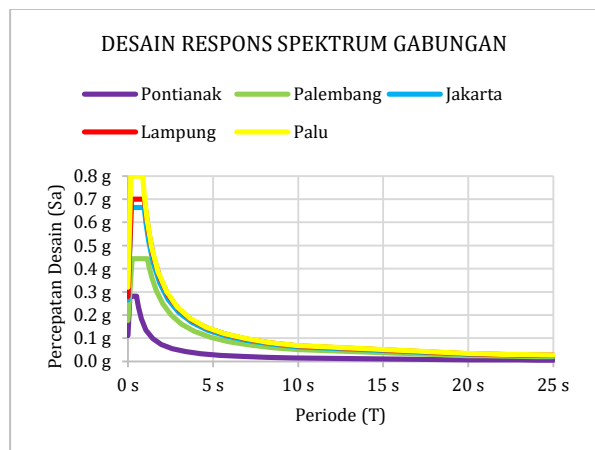
Hasil Perhitungan Pembebanan

Dalam pemberian pembebanan pada bangunan beton bertulang, diberikan nilai beban mati dan beban hidup yang sama pada setiap wilayahnya. Sedangkan, untuk beban gempa diberikan nilai yang berbeda sesuai dengan perhitungan beban gempa pada masing-masing wilayah. Dalam hal ini beban gempa dianalisis menggunakan metode respons spektrum [14]. Berikut disajikan dalam Tabel 5 mengenai perhitungan desain respons spektrum pada wilayah yang ditinjau.

Tabel 5. Parameter Kegempaan

Wilayah	S_{DS} (g)	S_{D1} (g)	T_0 (s)	T_s (s)
Pontianak	0,187	0,082	0,09	0,44
Palembang	0,443	0,507	0,23	1,14
Jakarta	0,664	0,630	0,19	0,95
Bandar Lampung	0,699	0,671	0,19	0,96
Palu	0,8	0,68	0,17	0,85

Dari parameter-parameter S_{DS} , S_{D1} , T_0 , dan T_s , dapat digambarkan kurva desain respons spektrum disetiap wilayah yang ditinjau yang disajikan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Desain Respons Spektrum Gabungan

Hasil Perhitungan Gaya Geser Dasar Seismik

Untuk mendapatkan hasil perhitungan gaya geser dasar seismik, dibutuhkan nilai periode fundamental struktur, koefisien desain seismik, dan berat struktur dalam perhitungannya. Berikut disajikan dalam Tabel 6 dan 7 berupa hasil perhitungan periode fundamental struktur, koefisien desain seismik, berat struktur, dan gaya geser dasar seismik.

Tabel 6. Periode Fundamental Struktur

Wilayah	S_{D1}	C_u	C_t	α
Pontianak	0,143	1,6	0,0466	0,9
Palembang	0,507	1,4	0,0466	0,9
Jakarta	0,630	1,4	0,0466	0,9
Bandar Lampung	0,671	1,4	0,0466	0,9
Palu	0,680	1,4	0,0466	0,9

Tabel 6. Periode Fundamental Struktur (Lanjutan)

Wilayah	T_a (s)	$C_u T_a$	$T_{a\text{ pakai}}$ (s)
Pontianak	0,600	0,840	0,680
Palembang	0,600	0,840	0,646
Jakarta	0,600	0,840	0,636
Bandar Lampung	0,600	0,840	0,617
Palu	0,600	0,840	0,613

Tabel 7. Koefisien Desain Seismik (C_s)

Wilayah	$C_{s\text{ min}}$	C_s	$C_{s\text{ maks}}$	$C_{s\text{ pakai}}$
Pontianak	0,019	0,053	0,039	0,039
Palembang	0,029	0,083	0,147	0,083
Jakarta	0,045	0,127	0,186	0,127
Bandar Lampung	0,050	0,142	0,204	0,142
Palu	0,056	0,150	0,208	0,150

Tabel 8. Berat Total Struktur dan Gaya Geser Dasar Seismik

Wilayah	C_s	W (ton)	V (ton)
Pontianak	0,038	4699,61	185,16
Palembang	0,083	4778,40	397,11
Jakarta	0,127	4935,99	626,11
Bandar Lampung	0,142	5007,88	711,16
Palu	0,150	5099,81	764,97

Dari Tabel 8, dapat dilihat bahwa wilayah Palu memiliki nilai gaya geser dasar terbesar dan wilayah Pontianak memiliki gaya geser dasar terkecil. Hal ini disebabkan karena pada wilayah Palu memiliki gaya gempa yang lebih besar dibandingkan dengan wilayah lainnya, sehingga koefisien kegempaan yang didapat lebih besar dan dapat memengaruhi nilai perhitungan gaya geser dasar seismik.

Hasil Perhitungan Simpangan Antar Lantai

Simpangan antar lantai dihitung berdasarkan simpangan lateral lantai yang terjadi, dimana gaya geser dasar juga memengaruhi nilai simpangan antar lantai [15]. Simpangan pada lantai tersebut terjadi akibat adanya gaya pada tiap lantai bangunan [4]. Gaya geser dasar yang didistribusikan ke setiap lantainya akan menghasilkan gaya lateral yang semakin besar sesuai dengan ketinggian struktur yang digunakan. Berikut disajikan dalam Tabel 9 dan 10 gaya lateral lantai yang diambil dari hasil program SAP 2000.

Tabel 9. Simpangan Lateral Lantai Arah X

Lt	H_x (m)	Pontianak		Palembang	
		δx_e (mm)	δx_i (mm)	δx_e (mm)	δx_i (mm)
4	4,2	7,517	27,563	14,653	53,726
3	4,2	5,724	20,989	11,120	40,774
2	4,2	3,637	13,337	7,093	26,007
1	4,5	1,624	5,953	3,265	11,970
Base	0	-	-	-	-

Tabel 9. Simpangan Lateral Lantai Arah X (Lanjutan)

Lt	H _x (m)	Jakarta		B. Lampung	
		δ _{xe} (mm)	δ _{xi} (mm)	δ _{xe} (mm)	δ _{xi} (mm)
4	4,2	21,726	79,663	22,667	83,112
3	4,2	16,482	60,432	17,244	63,227
2	4,2	10,569	38,751	11,140	40,848
1	4,5	4,960	18,185	5,369	19,685
Base	0	-	-	-	-

Tabel 9. Simpangan Lateral Lantai Arah X (Lanjutan)

Lt	H _x (m)	Palu	
		δ _{xe} (mm)	δ _{xi} (mm)
4	4,2	23,745	87,065
3	4,2	18,068	66,249
2	4,2	11,707	42,924
1	4,5	5,691	20,865
Base	0	-	-

Tabel 10. Simpangan Lateral Lantai Arah Y

Lt	H _y (m)	Pontianak		Palembang	
		δ _{ye} (mm)	δ _{yi} (mm)	δ _{ye} (mm)	δ _{yi} (mm)
4	4,2	7,439	27,275	14,516	53,226
3	4,2	5,680	20,828	11,007	40,358
2	4,2	3,622	13,280	7,009	25,700
1	4,5	1,626	5,963	3,243	11,891
Base	0	-	-	-	-

Tabel 10. Simpangan Lateral Lantai Arah Y (Lanjutan)

Lt	H _y (m)	Jakarta		B. Lampung	
		δ _{ye} (mm)	δ _{yi} (mm)	δ _{ye} (mm)	δ _{yi} (mm)
4	4,2	21,598	79,192	22,586	82,814
3	4,2	16,344	59,926	17,114	62,750
2	4,2	10,441	38,283	10,990	40,298
1	4,5	4,925	18,059	5,326	19,530
Base	0	-	-	-	-

Tabel 10. Simpangan Lateral Lantai Arah Y (Lanjutan)

Lt	H _y (m)	Palu	
		δ _{ye} (mm)	δ _{yi} (mm)
4	4,2	23,690	86,863
3	4,2	17,940	65,781
2	4,2	11,543	42,325
1	4,5	5,643	20,691
Base	0	-	-

Tabel 11. Simpangan Antar Lantai Arah X

Lt	H _x (m)	Δ _{xijin}	Pontianak		Palembang	
			Δ _{xi}	Ket	Δ _{xi}	Ket
4	4,2	63	6,57	OK	12,95	OK
3	4,2	63	7,65	OK	14,77	OK
2	4,2	63	7,38	OK	14,04	OK
1	4,5	67,5	5,95	OK	11,97	OK
Base	0	-	-	-	-	-

Tabel 11. Simpangan Antar Lantai Arah X (Lanjutan)

Lt	H _x (m)	Δ _{xijin}	Jakarta		B. Lampung	
			Δ _{xi}	Ket	Δ _{xi}	Ket
4	4,2	63	19,23	OK	19,88	OK
3	4,2	63	21,68	OK	22,38	OK
2	4,2	63	20,57	OK	21,16	OK
1	4,5	67,5	18,18	OK	19,68	OK
Base	0	-	-	-	-	-

Tabel 11. Simpangan Antar Lantai Arah X (Lanjutan)

Lt	H _x (m)	Δ _{xijin}	Palu		
			Δ _{xi}	Ket	Ket
4	4,2	63	20,81	OK	OK
3	4,2	63	23,32	OK	OK
2	4,2	63	22,06	OK	OK
1	4,5	67,5	20,86	OK	OK
Base	0	-	-	-	-

Tabel 12. Simpangan Antar Lantai Arah Y

Lt	H _y (m)	Δ _{yijin}	Pontianak		Palembang	
			Δ _{yi}	Ket	Δ _{yi}	Ket
4	4,2	63	6,44	OK	12,87	OK
3	4,2	63	7,55	OK	14,66	OK
2	4,2	63	7,32	OK	13,81	OK
1	4,5	67,5	5,96	OK	11,89	OK
Base	0	-	-	-	-	-

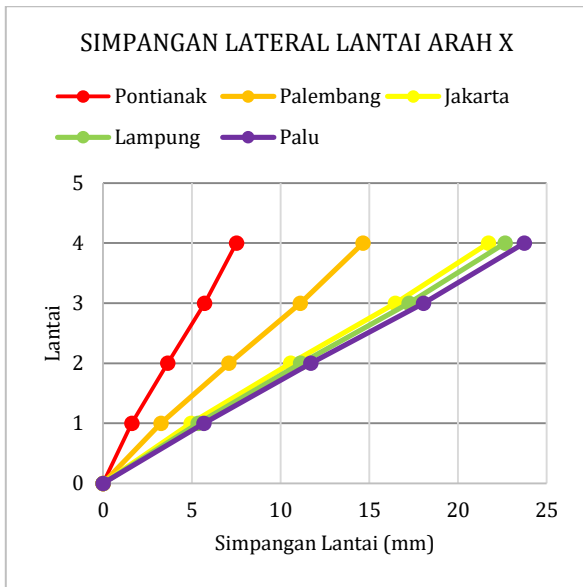
Tabel 12. Simpangan Antar Lantai Arah Y (Lanjutan)

Lt	H _y (m)	Δ _{yijin}	Jakarta		B. Lampung	
			Δ _{yi}	Ket	Δ _{yi}	Ket
4	4,2	63	19,27	OK	20,06	OK
3	4,2	63	21,64	OK	22,45	OK
2	4,2	63	20,22	OK	20,77	OK
1	4,5	67,5	18,06	OK	19,53	OK
Base	0	-	-	-	-	-

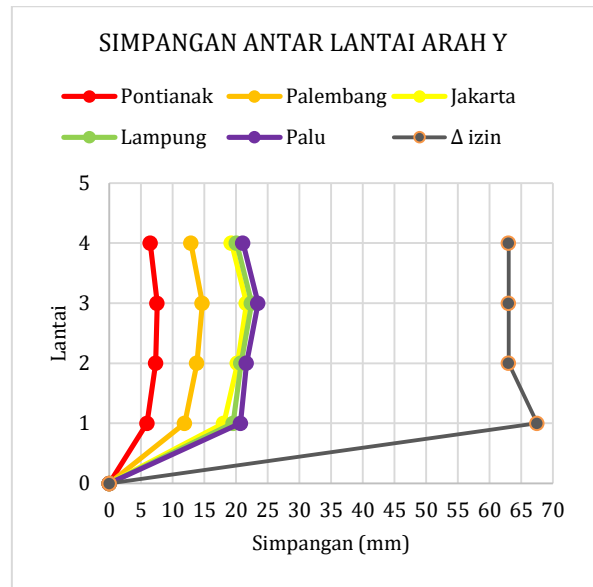
Tabel 12. Simpangan Antar Lantai Arah Y (Lanjutan)

Lt	H _y (m)	Δ _{yijin}	Palu	
			Δ _{yi}	Ket
4	4,2	63	21,08	OK
3	4,2	63	23,46	OK
2	4,2	63	21,63	OK
1	4,5	67,5	20,69	OK
Base	0	-	-	-

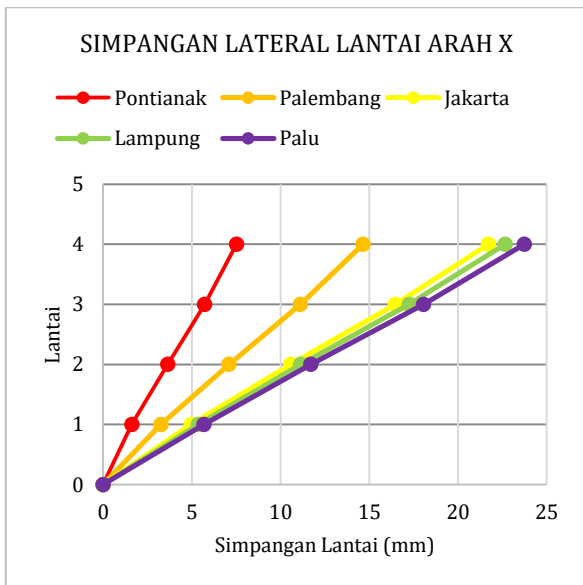
Dari perhitungan simpangan antar lantai yang disajikan dalam Tabel 11 dan 12, didapat bahwa simpangan antar lantai terbesar terdapat pada wilayah Palu dan yang terkecil terdapat pada wilayah Pontianak. Hal ini dikarenakan simpangan lateral pada wilayah Palu memiliki nilai yang besar dan hal tersebut juga diakibatkan karena gaya gempa yang besar. Simpangan antar lantai yang terbesar terdapat pada lantai 4 disetiap wilayahnya, hal ini dikarenakan distribusi gaya yang berpengaruh terhadap tinggi gedung. Perbedaan simpangan pada masing-masing wilayah disajikan pada Gambar 4, 5, 6 dan 7.



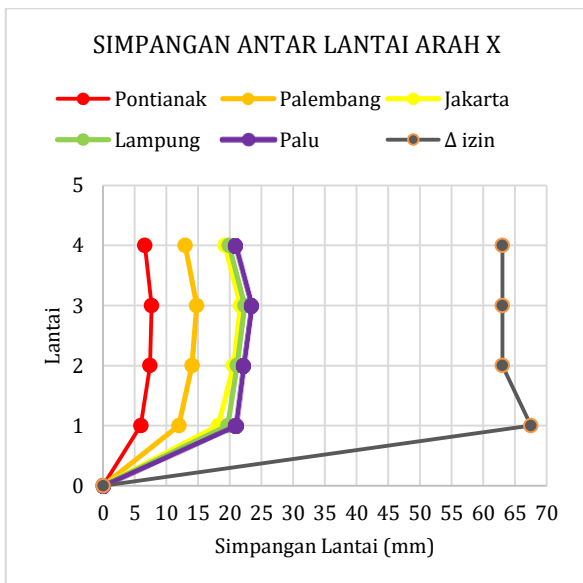
Gambar 4. Simpangan Lateral Lantai Arah X



Gambar 7. Simpangan Antar Lantai Arah Y



Gambar 5. Simpangan Lateral Lantai Arah Y



Gambar 6. Simpangan Antar Lantai Arah X

Hasil Analisis Kinerja Struktur

Untuk menentukan level kinerja struktur pada setiap wilayah, maka dilakukan perhitungan target perpindahan pada wilayah tersebut. Besaran target perpindahan dapat dilihat pada Tabel 13.

Tabel 13. Target Perpindahan pada Masing-Masing Wilayah

Koef	Pontianak		Palembang	
	X	Y	X	Y
T_e	0,583	0,583	0,583	0,580
T_s	0,5	0,5	1,1	1,1
C_0	1,4	1,4	1,4	1,4
C_1	1,0	1,0	1,1	0,8
C_2	1,0	1,0	1,0	1,1
C_3	1,0	1,0	1,0	1,0
S_a	0,306	0,306	0,689	0,689
$g(m/s^2)$	9,81	9,81	9,81	9,81
$\delta_T (m)$	0,037	0,037	0,084	0,066

Tabel 13. Target Perpindahan pada Masing-Masing Wilayah (Lanjutan)

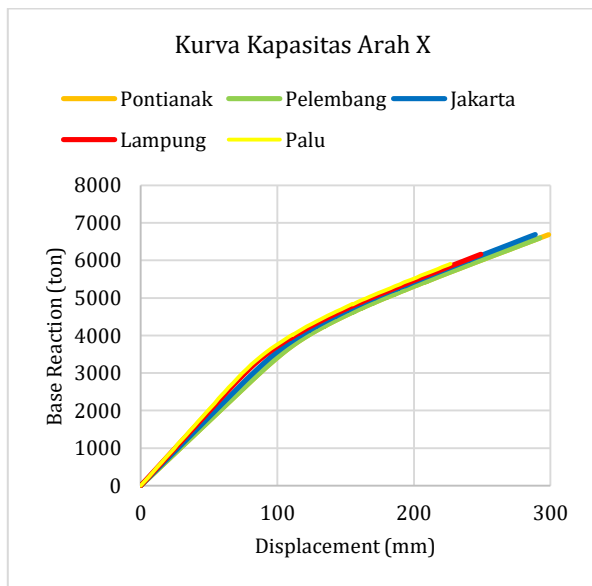
Koef	Jakarta		B. Lampung	
	X	Y	X	Y
T_e	0,574	0,572	0,559	0,557
T_s	0,9	0,9	0,9	0,9
C_0	1,4	1,4	1,4	1,4
C_1	1,0	1,0	1,0	1,0
C_2	1,0	1,0	1,0	1,0
C_3	1,0	1,0	1,0	1,0
S_a	0,908	0,908	0,919	0,919
$g(m/s^2)$	9,81	9,81	9,81	9,81
$\delta_T (m)$	0,105	0,104	0,101	0,100

Tabel 13. Target Perpindahan pada Masing-Masing Wilayah (Lanjutan)

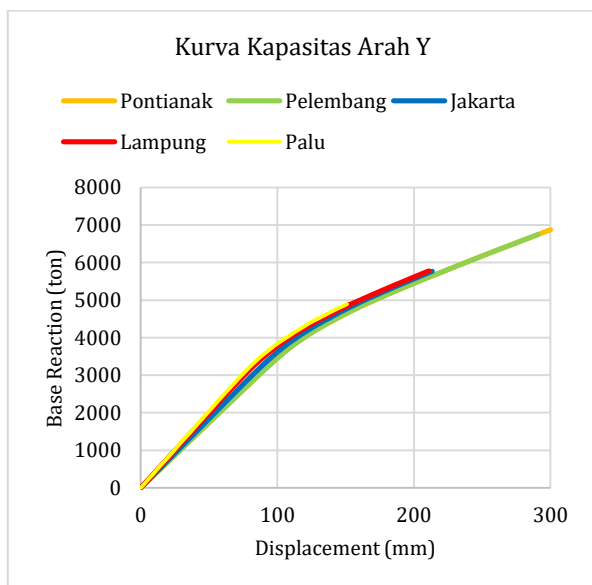
Koef	Palu	
	X	Y
T_e	0,556	0,554
T_s	0,9	0,9

Koef	Palu	
	X	Y
C ₀	1,4	1,4
C ₁	1,1	1,1
C ₂	1,0	1,0
C ₃	1,0	1,0
S _a	1,350	1,350
g(m/s ²)	9,81	9,81
δ _r (m)	0,151	0,149

Dari hasil Tabel 13, perbedaan dari hasil target perpindahan disebabkan karena adanya perbedaan pada beban lateral yang bekerja pada struktur masing-masing wilayah. Setelah ditentukan target perpindahan, kemudian hasil analisis *pushover* akan dievaluasi untuk menentukan level kinerja struktur yang ditentukan berdasarkan penyebaran sendi plastis. Kurva kapasitas pada arah X dan arah Y dari hasil analisis *pushover* pada setiap wilayah dapat dilihat pada Gambar 8 dan 9.



Gambar 8. Kurva Kapasitas Arah X



Gambar 9. Kurva Kapasitas Arah Y

Dari penyebaran sendi plastis, didapatkan tiga kondisi penyebaran sendi palstis yaitu pada kondisi target perpindahan tercapai, pada kondisi terjadinya leleh pertama, dan pada kondisi mencapai kondisi ultimit. Untuk menentukan level kinerja dari struktur, kondisi penyebaran sendi plastis yang dibutuhkan adalah pada saat mencapai kondisi tercapainya target perpindahan. Dengan tercapainya target perpindahan, maka dapat ditentukan titik kinerja yang didapat pada masing-masing wilayah. Rekapitulasi penyebaran sendi plastis pada kondisi tercapainya titik kinerja dapat dilihat pada Tabel 14.

Tabel 14. Penyebaran Sendi Plastis pada Kondisi Titik Kinerja (*Performance Point*)

Wilayah	Arah X		
	Step	Base Force (ton)	Disp (mm)
Pontianak	13	1343,38	39,00
Palembang	28	2899,54	84,20
Jakarta	33	3740,27	106,36
Bandar Lampung	32	3826,21	104,95
Palu	52	4839,58	155,15

Tabel 14. Penyebaran Sendi Plastis pada Kondisi Titik Kinerja (*Performance Point*) (Lanjutan)

Wilayah	Arah Y		
	Step	Base Shear (ton)	Disp (mm)
Pontianak	13	1356,26	39,00
Palembang	23	2399,07	69,00
Jakarta	33	3795,30	106,23
Bandar Lampung	31	3792,16	100,50
Palu	44	4895,47	151,02

Dari rekapitulasi penyebaran sendi plastis pada Tabel 14, maka dapat ditentukan level kinerjanya yang disajikan pada Tabel 15.

Tabel 15. Level Kinerja Struktur

Wilayah	Level Kinerja	
	Arah X	Arah Y
Pontianak	IO	IO
Palembang	IO	IO
Jakarta	IO	IO
Lampung	IO	IO
Palu	IO	B

Dari Tabel 15, dapat dilihat bahwa wilayah Palu berada pada level kinerja B dan IO dimana level kinerja tersebut pada arah Y tidak terjadi kerusakan baik struktural maupun nonstruktural sedangkan pada arah X, struktur mengalami kerusakan non struktural, namun struktur tersebut masih memiliki kekuatan yang sama sebelum struktur diberikan gaya. Hal ini dipengaruhi oleh dimensi elemen struktur pada wilayah Palu lebih besar dibandingkan dengan wilayah lainnya, sehingga kekakuan bangunan pada wilayah Palu lebih tinggi dibandingkan dengan wilayah lainnya. Semakin kaku suatu bangunan maka semakin kuat bangunan tersebut dapat menahan beban yang

diberikan. Oleh karena itu pada wilayah Palu tidak mengalami kerusakan elemen struktural maupun non-struktural dan dihasilkan level kinerja B.

KESIMPULAN

Hasil analisis linear menunjukkan bahwa gaya geser terbesar dimiliki oleh gedung di wilayah Palu sebesar 764,97 ton, sedangkan gaya geser terkecil dimiliki oleh gedung di wilayah Pontianak sebesar 185,16 ton. Hal ini disebabkan karena gaya gempa yang terjadi pada wilayah Palu, lebih besar dibandingkan dengan wilayah lainnya, sehingga nilai koefisien kegempaan yang didapat lebih besar dan memengaruhi nilai gaya geser dasar seismik. Besaran gaya geser dasar pada struktur ini akan memengaruhi nilai dari simpangan lateral dan simpangan antar lantai, sehingga nilai simpangan lateral dan simpangan antar lantai pada struktur, berbanding lurus dengan nilai gaya geser dasar. Hasil analisis kinerja struktur berdasarkan analisis *pushover* pada masing-masing wilayah memiliki level kinerja B dan didominasi IO. Dimana Struktur yang berada pada level kinerja B terjadi di wilayah Palu arah Y, sedangkan untuk struktur yang lainnya berada pada level kinerja IO. Level kinerja yang didapatkan relatif sama (IO), hal ini dikarenakan struktur memiliki kekakuan yang cukup tinggi sehingga struktur mampu menahan gaya yang bekerja sampai batas level kinerja IO. Bila kondisi ini dihubungkan dengan dimensi elemen struktur, maka dapat disimpulkan bahwa dibutuhkan dimensi elemen struktur yang lebih besar di wilayah gempa tinggi untuk mencapai kondisi elemen struktur yang aman agar analisis dapat dilanjutkan pada analisis *pushover*, sehingga kekakuan dan level kinerja struktur menjadi meningkat.

REFERENSI

- [1] A. S. Elnashai and L. Di Sarno, *Fundamentals of Earthquake Engineering*. John Wiley and Sons, 2008.
- [2] A. J. Pierre and I. Hidayat, "Seismic performance of reinforced concrete structures with pushover analysis," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 426, no. 1, p. 012045, Feb. 2020.
- [3] F. P. Hsiao, Y. Oktavianus, and Y. C. Ou, "A pushover seismic analysis method for asymmetric and tall buildings," *J. Chinese Inst. Eng. Trans. Chinese Inst. Eng. A*, vol. 38, no. 8, 2015.
- [4] R. Cornelis, W. Bunganaen, and B. H. U. Tay, "Analisis Perbandingan Gaya Geser Tingkat, Gaya Geser Tingkat dan Simpangan Antar Tingkat Akibat Beban Gempa Berdasarkan Peraturan Gempa SNI 1726-2002 dan SNI 1726-2012," *Tek. Sipil*, vol. III, no. 2, pp. 205–216, 2014.
- [5] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa

Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung." 2019.

- [6] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 1727:2020 Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait Untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain." 2020.
- [7] N. H. Crista, T. N. Widorini, and L. N. Angraini, "Perbandingan Tulangan Lentur pada Gedung Fakultas Psikologi Universitas Semarang dengan Membandingkan Peraturan SNI Gempa 2012 dengan SNI Gempa 2019," *J. Pengemb. Rekayasa dan Teknol.*, vol. 16, no. 2, pp. 143–162, 2020.
- [8] B. Nasution and A. Purqon, "Uji Respon Struktur Bangunan Bertingkat Terhadap Gempa Bumi Menggunakan Metode Elemen Hingga," in *Prosiding SNIPS 2016*, 2016.
- [9] I. Samsya, "Evaluasi Aplikasi Penggunaan Base Isolation pada Gedung Grand Keisha Menggunakan Analisa Pushover," Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya, 2017.
- [10] R. N. Pujianto, "Analisis Gempa Non-Linier Statik Pushover Dengan Metode Fema 440 Untuk Evaluasi Kinerja Struktur Bangunan Gedung," in *Prosiding Seminar Nasional: Keandalan Infrastruktur Pekerjaan Umum Perumahan Rakyat Bagi Kemajuan Bangsa*, 2019, pp. 129–142.
- [11] FEMA, "Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures," *FEMA 440, Federal Emergency Management Agency, Washington DC*, vol. 440, no. June. p. 392, 2005.
- [12] Tavio and U. Wijaya, *Desain Rekayasa Gempa Berbasis Kinerja (Performance Based Design)*, 2nd ed. Andi, 2018.
- [13] D. Purnamasari, "Analisis Kinerja Struktur Beton Bertulang dengan Variasi Konfigurasi Dinding Geser Menggunakan Pushover Analysis," Universitas Sriwijaya, 2019.
- [14] W. A. R. Suryanita, and Z. Djauhari, "Prediksi Respons Struktur Gedung Berdasarkan Respons Spektrum Gempa Indonesia Menggunakan Metode Jaringan Saraf Tiruan," *J. Sainstek STT Pekanbaru*, vol. 4, no. 1, pp. 1–15, 2016.
- [15] B. Junita, "Respon Struktur Bangunan Tinggi dengan Variasi Penempatan Outrigger Terhadap Beban Lateral (Studi Kasus: Bangunan Tower A ST. Moritz Panakukang)," Universitas Negeri Jakarta, 2018.

NOMENKLATUR

- | | |
|---------------|---|
| B1 | Jenis pertama elemen balok |
| B2 | Jenis kedua elemen balok |
| BA | Balok anak |
| C_u | Koefisien untuk batasan atas pada periode yang dihitung |
| C_t dan x | Parameter periode pendekatan |
| C_s | Koefisien desain seismik |

C_0	Faktor modifikasi untuk perpindahan spektral menjadi perpindahan atap/puncak (lantai teratas yang tidak dihuni). Umumnya menggunakan faktor partisipasi ragam pertama atau berdasarkan Tabel 3-2 dari FEMA 356.
C_1	Faktor modifikasi untuk menghubungkan perpindahan inelastik maksimum dengan perpindahan yang dihitung dari respons elastik linier.
C_2	Faktor modifikasi yang mewakili efek dari bentuk histeretis pada perpindahan maksimum.
C_3	Koefisien untuk memperhitungkan pembesaran lateral akibat efek P-Delta. Jika gedung pada kondisi pasca leleh kekakuannya positif (kurva meningkat) maka $C_3 = 1$.
C_d	Faktor pembesaran simpangan lateral
DL	Beban mati (<i>dead load</i>)
h_n	Tinggi total bangunan
I_e	Faktor keutamaan gempa
LL	Beban hidup (<i>live load</i>)
R	Koefisien modifikasi respons
RX0	Beban gempa arah X tanpa eksentrisitas
RX1	Beban gempa arah X dengan eksentrisitas
RY0	Beban gempa arah Y tanpa eksentrisitas
RY1	Beban gempa arah Y dengan eksentrisitas
S_s	Periode pendek
S_1	Periode 1 detik
S_a	Akselerasi respon spektrum yang berhubungan dengan waktu getar alami efektif pada arah yang ditinjau
S_{DS}	Parameter percepatan respons spektral pada periode pendek
S_{D1}	Parameter percepatan respons spektral pada periode 1 detik
T_a	Periode fundamental pendekatan
T_e	Waktu getar efektif
T_x	<i>Time period</i> arah X
T_0 dan T_s	Ambang batas penentuan periode fundamental
V	Gaya geser dasar seismik
W	Berat struktur
Ω_0	Faktor kuat lebih
δ_e	Simpangan pusat massa di tingkat-x
δ_i	Simpangan pada lokasi yang disyaratkan
Δ_{izin}	Simpangan antar lantai izin
Δ_1	Simpangan antar lantai
Δ_x	Target perpindahan