



Analisis Dinamik Struktur Gedung Ketidakberaturan Sudut Dalam Studi Kasus: Gedung Apartemen 8 Lantai

Jonathan C. Wereh^{#a}, Ronny E. Pandaleke^{#b}, Banu D. Handono^{#c}

[#]Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia

^ajonathanwereh@gmail.com, ^bronny_pandaleke@yahoo.com, ^cbanu2h@unsrat.ac.id

Abstrak

Analisis dinamik digunakan untuk mengevaluasi respons struktur terhadap beban gempa berdasarkan karakteristik getaran alami dan respons spektrum. Gedung apartemen 8 lantai berbentuk huruf U dalam studi ini memiliki ketidakberaturan sudut yang berpotensi menyebabkan konsentrasi tegangan tinggi dan kerusakan struktural saat gempa. Sesuai SNI 1726:2019, analisis dinamik diperlukan untuk mengevaluasi respons dan perilaku struktur secara akurat terhadap beban gempa. Studi dilakukan pada struktur gedung apartemen yang berlokasi di Kelurahan Tingkulu, Kecamatan Wanea, Kota Manado, Provinsi Sulawesi Utara, yang termasuk dalam zona rawan gempa. Analisis dinamik struktur dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *ETABS 21*, yang digunakan untuk memodelkan struktur gedung tiga dimensi serta memprediksi simulasi getaran yang terjadi pada struktur akibat berbagai besaran gempa berdasarkan grafik respons spektrum. Bangunan memiliki fungsi sebagai apartemen, dengan tinggi antar lantai 3,5 meter, panjang 72 meter, dan lebar 48 meter. Hasil analisis menunjukkan bahwa periode fundamental struktur adalah 1,041 detik (arah X) dan 1,037 detik (arah Y), masih berada di bawah batas maksimum ($T_{max} = 1,309$ detik), sehingga struktur dinyatakan aman. Persentase partisipasi massa kumulatif telah mencapai lebih dari 90% pada mode ke-13, dan gaya geser dasar yang dihitung manual maupun dari *ETABS* sama besar yaitu 21.752,39 kN untuk arah X dan Y. *Inelastic drift* terbesar terjadi pada lantai 4 dengan nilai 21,808 mm (arah X) dan 23,936 mm (arah Y), masih berada di bawah batas *drift limit* yaitu 53,846 mm, sehingga struktur memenuhi syarat keamanan terhadap simpangan antar lantai. Selain itu, hasil analisis *p-delta* menunjukkan nilai koefisien stabilitas tertinggi sebesar 0,0194 (arah X) dan 0,0207 (arah Y), yang berada jauh di bawah batas maksimum 0,0909, sehingga struktur dinyatakan stabil terhadap pengaruh gempa.

Kata kunci: analisis dinamik, gempa, gedung apartemen, ketidakberaturan sudut dalam, SNI 1726:2019

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Gempa bumi merupakan bencana alam yang paling berbahaya yang dapat menyebabkan kegagalan dan kerusakan struktur gedung serta memakan banyak korban jiwa. Gempa bumi adalah getaran kuat dari dalam bumi, kemudian merambat ke permukaan bumi yang diakibatkan oleh pergerakan lempeng bumi, aktivitas gunung api, longsoran (di bawah muka air laut) atau ledakan bom nuklir di bawah permukaan bumi. Gempa bumi terjadi karena pergeseran lapisan bumi yang menyebabkan getaran kuat. Getaran ini menyebar dalam bentuk gelombang yang dapat membuat tanah dan bangunan di atasnya bergetar. Akibatnya, bangunan akan mengalami gaya-gaya yang dapat mempengaruhi kestabilannya karena bangunan cenderung melawan gerakan yang terjadi (Schodek, 1999).

Indonesia berada di antara tiga pertemuan lempeng tektonik besar, yaitu lempeng Eurasia, lempeng Indo-Australia, dan lempeng Pasifik. Letak geografis wilayah Indonesia yang berada pada jalur Lingkaran Api Pasifik atau Kawasan Sabuk Cincin Api Pasifik (*Pacific ring of fire belt area*) menyebabkan Indonesia berpotensi tinggi terhadap ancaman gempa bumi.

Menurut buku Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia tahun 2022, di utara Pulau Sulawesi terdapat zona subduksi yang aktif, di mana lempeng tektonik bergerak dengan kecepatan

sekitar 42-50 mm per tahun. Dengan hal ini Sulawesi Utara menjadi wilayah rawan gempa. Oleh karena itu, dalam perencanaan pembangunan gedung bertingkat di lokasi Sulawesi Utara harus memperhitungkan pengaruh gempa pada struktur gedung rencana.

Dalam SNI 1726:2019 untuk memperhitungkan pengaruh gempa pada struktur gedung dapat menggunakan analisis statik (statik ekuivalen) dan analisis dinamik (respons spektrum dan riwayat waktu). Namun, tidak semua kategori struktur bangunan dapat menggunakan analisis statik ekuivalen. Bangunan tinggi yang memiliki ketidakberaturan struktur dan berada di daerah yang memiliki pengaruh gempa tinggi harus menggunakan analisis dinamik dalam perhitungan beban gempa. Sekarang ini banyak gedung bertingkat yang memiliki ketidakberaturan struktur seperti gedung sekolah, asrama, mall, hotel, rumah sakit, apartemen, perkantoran serta gedung lainnya. Gedung bertingkat dengan ketidakberaturan struktur sangat rawan mengalami kegagalan struktur ketika terjadi gempa.

Fokus penelitian ini adalah gedung apartemen 8 lantai. Namun, sesuai dengan gambar denah struktur, gedung ini memiliki ketidakberaturan sudut dalam karena denah geometri struktur gedung ini berbentuk huruf U. Dalam buku *Some Concepts in Earthquake Behaviour of Buildings* tahun 2012, denah geometri struktur yang rumit seperti bentuk huruf L, T, U, V, X, Y mengalami tegangan yang besar di sudut dalam struktur bangunan dan dapat menyebabkan kerusakan yang signifikan selama gempa bumi. Sehingga sesuai SNI 1726:2019, analisis beban gempa pada gedung apartemen harus menggunakan analisis dinamik, karena gedung ini memiliki banyak lantai, adanya ketidakberaturan sudut dalam dan berada di daerah rawan gempa bumi.

Analisis dinamik adalah metode analisis struktur yang mempertimbangkan efek dinamis dari gempa bumi pada bangunan. Dalam analisis dinamik distribusi gaya geser gempa pada setiap tingkat bangunan dihitung dengan memperhitungkan respons struktur terhadap gerakan tanah yang dinamis. Untuk analisis dinamik struktur gedung apartemen 8 lantai akan menggunakan bantuan program *ETABS 21* dalam memodelkan struktur gedung 3 dimensi dengan memprediksi simulasi getaran yang terjadi pada struktur gedung dengan berbagai besaran gempa berdasarkan grafik respons spektrum.

Selain itu, pengecekan ketidakberaturan horizontal dan vertikal pada struktur gedung harus ditinjau sesuai dengan SNI 1726:2019 agar dapat mengambil langkah perbaikan tambahan sesuai prosedur yang disyaratkan, agar bangunan dapat tahan terhadap gempa, mengurangi risiko keruntuhan struktur, memastikan keselamatan penghuni dan mengurangi kerusakan pada struktur bangunan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian yang telah diuraikan, rumusan masalah yang diambil adalah bagaimana hasil dari analisis dinamik gedung apartemen 8 lantai dengan ketidakberaturan sudut dalam terhadap pengaruh gempa?

1.3. Batasan Masalah

Batasan-batasan yang digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut:

1. Elemen struktur gedung yang digunakan adalah struktur beton bertulang.
2. Pembebaan yang digunakan adalah beban mati, hidup dan gempa.
3. Gambar desain menggunakan program *Revit 2024*.
4. Analisis struktur gedung menggunakan program *ETABS 21*.
5. Peraturan yang digunakan adalah sebagai berikut:
 - a. Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung (SNI 1726:2019).
 - b. Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain (SNI 1727:2020).
 - c. Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan (SNI 2847:2019).

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian adalah mengetahui hasil dari analisis dinamik gedung apartemen 8 lantai dengan ketidakberaturan sudut dalam terhadap pengaruh gempa.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Manfaat penelitian untuk penulis:
 - a. Menambah pengetahuan tentang analisis dinamik struktur gedung ketidakberaturan sudut dalam akibat gempa.
 - b. Menambah pengetahuan tentang penggunaan program *ETABS 21* dan program *Revit 2024*.
2. Manfaat penelitian untuk pembaca:
 - a. Memberikan pengetahuan Teknik Sipil tentang analisis dinamik struktur gedung ketidakberaturan sudut dalam akibat gempa.
 - b. Dapat digunakan sebagai bahan referensi untuk penelitian selanjutnya.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan metode studi kasus untuk menganalisis dinamika struktur gedung apartemen 8 lantai dengan ketidakberaturan sudut dalam. Studi kasus ini bertujuan untuk memahami perilaku struktur gedung apartemen 8 lantai dengan ketidakberaturan sudut dalam ketika terkena beban gempa.

2.1. Pedoman Penelitian

1. Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung (SNI 1726:2019).
2. Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain (SNI 1727:2020).
3. Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan (SNI 2847:2019).

2.2. Data Penelitian

1. Data Struktur Bangunan:

- Fungsi bangunan	: Apartemen
- Tinggi antar lantai	: 3,5 meter
- Panjang bangunan	: 72 meter
- Lebar bangunan	: 48 meter
2. Data Material
 - a. Spesifikasi material beton

- Mutu beton (f_c')	: 35 MPa
- Berat jenis	: 2.400 kg/m ³
- Modulus elastisitas	: $4.700\sqrt{f_c'} = 27.805,5749806$ MPa
 - b. Spesifikasi material baja

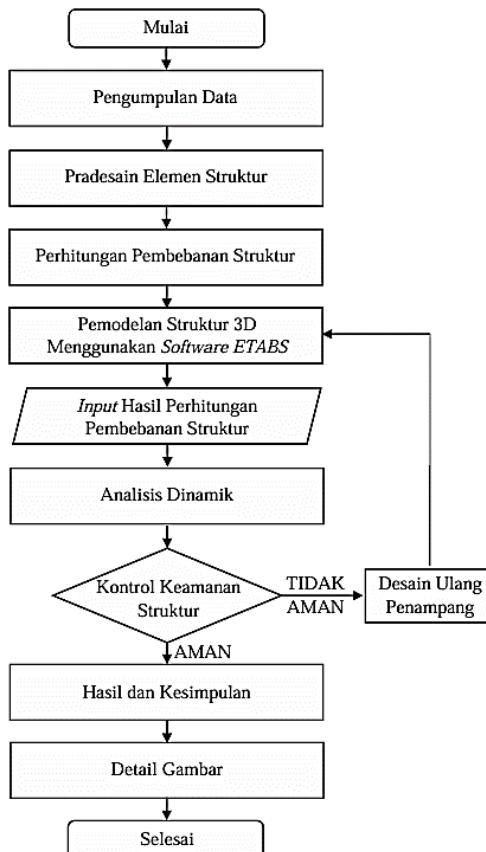
- Mutu Baja Tulangan Utama (f_y)	: 420 MPa (BjTS 420B)
- Mutu Baja Tulangan Sengkang (f_{ys})	: 280 MPa (BjTP 280)
- Modulus Elastisitas Baja	: 200.000 MPa
3. Data Beban

Pembebaan pada struktur menggunakan beban mati, hidup dan gempa.
4. Data Kondisi Tanah

Berdasarkan laporan penyelidikan tanah *Standard Penetration Test (SPT)*. Jenis tanah adalah tanah sedang dengan nilai $\bar{N} < 50$.

2.3. Bagan Alir Penelitian

Bagan alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.

**Gambar 1.** Bagan Alir

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Parameter Percepatan Gempa

Parameter Percepatan Gempa diperoleh melalui *web Desain Spektra Indonesia* Kementerian PUPR berdasarkan lokasi gempa. Dalam perencanaan ini digunakan lokasi di Kelurahan Tingkulu, Kecamatan Wanea, Kota Manado, Provinsi Sulawesi Utara.

- Parameter percepatan respons spektral MCE dari peta gempa pada periode pendek (S_s)
 $S_s = 1,0402 \text{ g}$
- Parameter percepatan respons spektral MCE dari peta gempa pada periode 1 detik (S_1)
 $S_1 = 0,4648 \text{ g}$

3.2. Kelas Lokasi (Jenis Tanah)

Berdasarkan laporan penyelidikan tanah *Standard Penetration Test (SPT)* di Kel. Tingkulu, Kec. Wanea, Kota Manado, Sulawesi Utara. Jenis tanah adalah tanah sedang dengan nilai $\bar{N} < 50$.

3.3. Kategori Desain Seismik (KDS)

- Koefisien Sitas
 - Faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek (F_a)
 $F_a = 1,08392$
 - Faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik (F_v)
 $F_v = 1,8352$
- Parameter Respon Percepatan
 - Parameter respons spektral percepatan pada periode pendek (S_{MS})
 $S_{MS} = F_a \times S_s = 1,08392 \times 1,0402 = 1,127493584 \text{ g}$
 - Parameter respons spektral percepatan pada periode 1 detik (S_{M1})
 $S_{M1} = F_v \times S_1 = 1,8352 \times 0,4648 = 0,85300096 \text{ g}$

3. Parameter Respon Spektral

- Parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek (S_{DS})
 $S_{DS} = 2/3 S_{MS} = 2/3 \times 1,127493584 = 0,751662389 \text{ g}$
- Parameter percepatan spektral desain untuk periode 1 detik (S_{D1})
 $S_{D1} = 2/3 S_{M1} = 2/3 \times 0,85300096 = 0,568667307 \text{ g}$

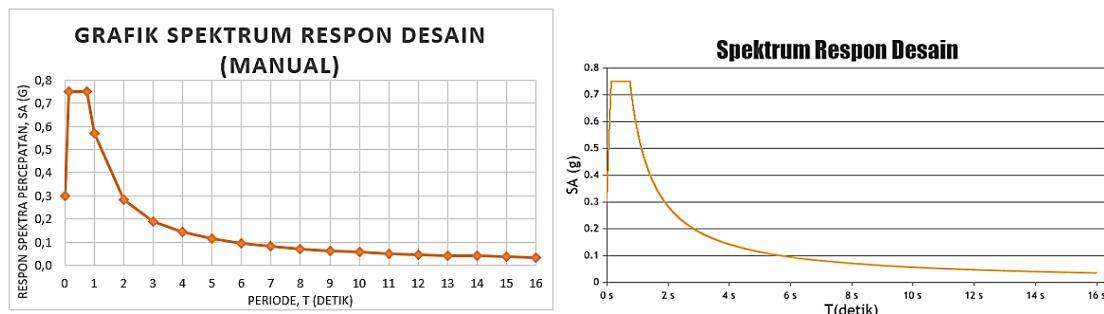
Karena nilai $S_{DS} = 0,50 \leq 0,751662389$ dan $S_{D1} = 0,20 \leq 0,568667307$, maka struktur gedung ini adalah kategori desain seismik D.

3.4. Pemilihan Sistem Struktur

Sistem struktur yang digunakan adalah rangka beton bertulang pemikul momen khusus. Pada kategori desain seismik struktur tipe D, berlaku nilai-nilai faktor dan koefisien berikut:

- Koefisien Modifikasi Respon, $R = 8$
- Faktor Kuat Lebih Sistem, $\Omega_0 = 3$
- Koefisien Amplifikasi Defleksi, $C_d = 5,5$

3.5. Spektrum Respon Desain



Gambar 1. (a) Spektrum Respon Desain (Manual); (b) Spektrum Respon Desain (Website)
(Sumber: (a) Software Excel; (b) Website Desain Spektra Indonesia Kementerian PUPR)

3.6. Kontrol Periode Fundamental Struktur

Periode getar alami bangunan merupakan waktu yang dibutuhkan struktur bangunan untuk menempuh satu putaran lengkap dari suatu getaran yang mengalami perpindahan posisi keseimbangan statis dan kembali ke posisi awal.

- Koefisien untuk Batas Periode

$$\begin{aligned} C_u &= 1,4 \text{ (SNI 1726:2019 Tabel 17)} \\ C_t &= 0,0466 \text{ (SNI 1726:2019 Tabel 18)} \\ x &= 0,9 \text{ (SNI 1726:2019 Tabel 18)} \end{aligned}$$

- Tinggi Bangunan (Seismik)

$$h = 28 \text{ m}$$

- Periode Fundamental Pendekatan

$$\begin{aligned} T_a &= C_t \cdot h_x \\ &= 0,0466 \times 28 \times 0,9 \\ &= 0,9350 \text{ detik} \end{aligned}$$

- Periode Maksimum

$$T_{\max} = C_u \cdot T_a = 1,4 \times 0,9350 = 1,309 \text{ detik}$$

- Periode Fundamental Pendekatan Hasil Analisa Program ETABS

$$\text{Arah X} = 1,041 \text{ detik}$$

$$\text{Arah Y} = 1,037 \text{ detik}$$

- Periode Pakai Arah X

$$T_c = 1,041 \text{ detik}$$

$$T_a = 0,9350 \text{ detik}$$

$$T_{\max} = 1,309 \text{ detik}$$

Syarat $T_a < T_c < T_{\max}$, maka digunakan $T_X = T_c$

$$T_X = 1,041 \text{ detik}$$

- Periode Pakai Arah Y

$$\begin{aligned}
 T_c &= 1,037 \text{ detik} \\
 T_a &= 0,9350 \text{ detik} \\
 T_{\max} &= 1,309 \text{ detik} \\
 \text{Syarat } T_a < T_c < T_{\max}, \text{ maka digunakan } T_Y &= T_c \\
 T_Y &= 1,037 \text{ detik}
 \end{aligned}$$

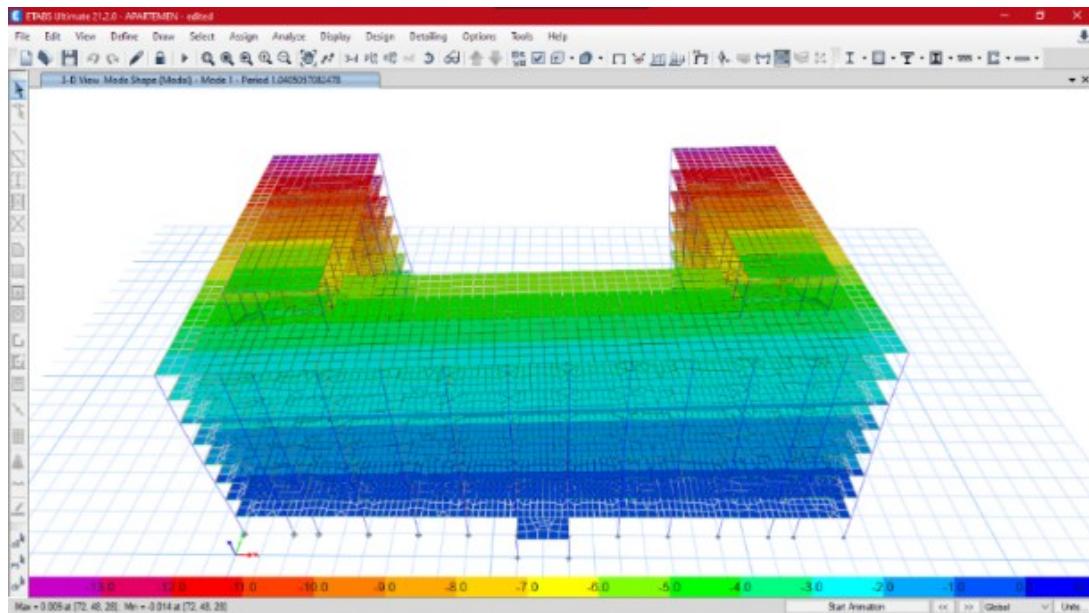
3.7. Kontrol Periode Fundamental Struktur

Tabel 1. Kontrol Partisipasi Massa

Case	Mode	Period (sec)	SumUX	SumUY	SumRZ
Modal	1	1,041	0,358	0,000001876	0,4187
Modal	2	1,037	0,358	0,7757	0,4187
Modal	3	0,993	0,7754	0,7757	0,7774
Modal	4	0,513	0,7754	0,7757	0,7774
Modal	5	0,316	0,8235	0,7757	0,8348
Modal	6	0,315	0,8235	0,8871	0,8348
Modal	7	0,303	0,8817	0,8871	0,8866
Modal	8	0,287	0,8876	0,8871	0,8882
Modal	9	0,276	0,8876	0,8871	0,8882
Modal	10	0,214	0,8877	0,8871	0,8886
Modal	11	0,166	0,8877	0,932	0,8886
Modal	12	0,163	0,898	0,932	0,9229
Modal	13	0,161	0,9332	0,932	0,9326

Berdasarkan hasil *output* program *ETABS*, ragam getar pada modal ke-13 sudah memenuhi persyaratan minimal 90% ragam getar struktur dari total keseluruhan partisipasi massa, dimana analisis modal yang dilakukan sudah mencakup sebagian besar respons dinamis struktur gedung apartemen. Berikut ini adalah bentuk mode getar 1 (arah X), mode getar 2 (arah Y) dan mode getar 3 (arah Z) pada gedung apartemen.

1. Mode Getar 1 (Arah X)



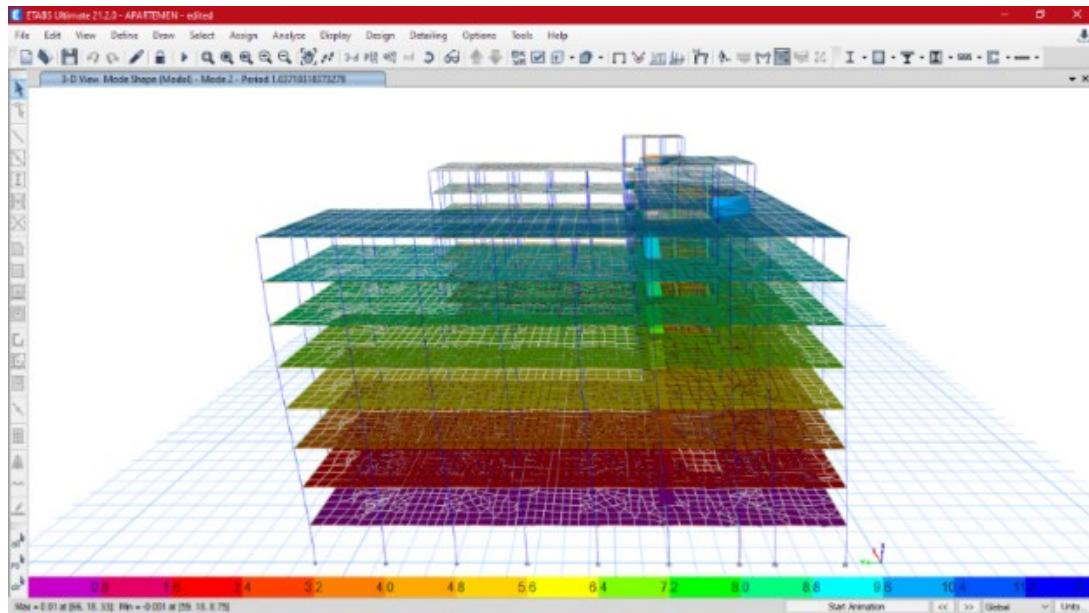
Gambar 3. Mode Getar 1 (Arah X)
(Sumber: Software *ETABS*)

Hasil pemeriksaan:

Struktur mengalami translasi 1,041 detik arah sumbu x ketika terjadi gempa. Artinya, struktur akan bergoyang secara linier ke arah sumbu X dan memerlukan 1,041 detik untuk kembali ke posisi awal. Dalam hal ini, gedung apartemen dinyatakan aman terhadap translasi mode getar 1

(arah X) karena waktu yang dibutuhkan struktur bangunan untuk menempuh satu putaran lengkap dari suatu getaran belum melewati batas periode izin $T_{max} = 1,309$ detik.

2. Mode Getar 2 (Arah Y)

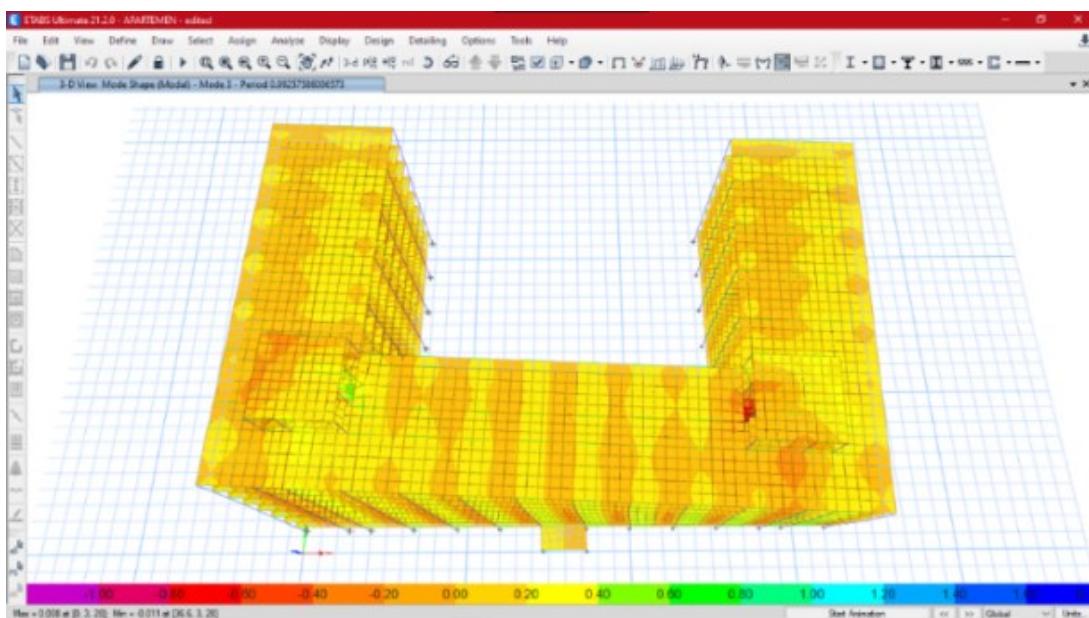


Gambar 4. Mode Getar 2 (Arah Y)
(Sumber: Software ETABS)

Hasil pemeriksaan:

Struktur mengalami translasi 1,037 detik arah sumbu Y ketika terjadi gempa. Artinya, struktur akan bergoyang secara linier ke arah sumbu Y dan memerlukan 1,037 detik untuk kembali ke posisi awal. Dalam hal ini, gedung apartemen dinyatakan aman terhadap translasi mode getar 2 (arah Y) karena waktu yang dibutuhkan struktur bangunan untuk menempuh satu putaran lengkap dari suatu getaran belum melewati batas periode izin $T_{max} = 1,309$ detik.

3. Mode Getar 3 (Arah Z)



Gambar 5. Mode Getar 3 (Arah Z)
(Sumber: Software ETABS)

Hasil pemeriksaan:

Struktur mengalami torsi 0,993 detik arah sumbu Z ketika terjadi gempa. Artinya, struktur akan bergoyang dengan rotasi ke arah sumbu Z dan memerlukan 0,993 detik untuk kembali ke posisi

awal. Dalam hal ini, gedung apartemen dinyatakan aman terhadap torsi mode getar 3 (arah Z) karena waktu yang dibutuhkan struktur bangunan untuk menempuh satu putaran lengkap dari suatu getaran belum melewati batas periode izin $T_{max} = 1,309$ detik.

3.8. Kontrol Gaya Geser Dasar (Base Shear)

Menurut SNI 1726:2019 Pasal 7.9.1.4, apabila kombinasi respons untuk gaya geser dasar hasil analisis ragam (V_t) kurang dari 100 % dari gaya geser (V) yang dihitung melalui metode statik ekuivalen, maka gaya tersebut harus dikalikan dengan V/V_t , dimana V adalah gaya geser dasar statik ekuivalen dan V_t adalah gaya geser dasar yang didapatkan dari hasil analisis kombinasi ragam.

a. Koefisien Respons Seismik

$$C_s = S_{DS} / (R / I_c) = 0,7517 / (8 / 1) = 0,0940$$

$$W = 231.512,37 \text{ kN (hasil program ETABS)}$$

b. Gaya Geser Statik (Manual)

$$V = C_s \cdot W$$

$$V_x = 0,0940 \times 231.512,37 = 21.752,39 \text{ kN}$$

$$V_y = 0,0940 \times 231.512,37 = 21.752,39 \text{ kN}$$

c. Gaya Geser Statik (ETABS)

$$V_x = 21.752,39 \text{ kN}$$

$$V_y = 21.752,39 \text{ kN}$$

3.9. Simpangan Antar Tingkat

Untuk kategori desain seismik D, simpangan antar tingkat desain (Δ) tidak boleh melebihi simpangan antar tingkat ijin, Δ_a / Δ , untuk semua tingkat dimana Δ_a diambil 0,020hsx sesuai dengan tipe struktur dan kategori risiko bangunan yaitu kategori risiko II. Karena struktur mengalami ketidakberaturan torsi 1.a dan berada pada KDS D maka, faktor redundansi (ρ) harus sebesar 1,3.

Tabel 2. Simpangan Antar Tingkat

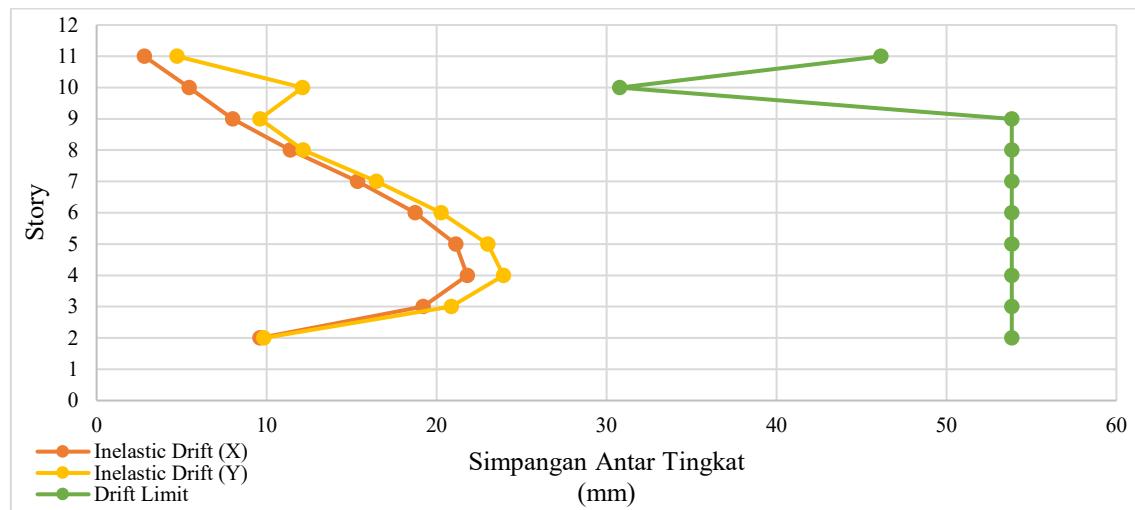
Story	<i>Displacement</i>		<i>Elastic Drift</i>		<i>h</i> (mm)	<i>Inelastic Drift</i>		<i>Drift Limit</i> (mm)	Cek
	δ_{ex} (mm)	δ_{ey} (mm)	δ_{ex} (mm)	δ_{ey} (mm)		Δ_x (mm)	Δ_y (mm)		
11	24,273	27,813	0,510	0,859	3000	2,805	4,724	46,154	OK
10	23,763	26,954	0,989	2,204	2000	5,440	12,122	30,769	OK
9	22,774	24,750	1,455	1,746	3500	8,003	9,603	53,846	OK
8	21,319	23,004	2,071	2,208	3500	11,391	12,144	53,846	OK
7	19,248	20,796	2,790	2,993	3500	15,345	16,462	53,846	OK
6	16,458	17,803	3,408	3,684	3500	18,744	20,262	53,846	OK
5	13,050	14,119	3,844	4,184	3500	21,142	23,012	53,846	OK
4	9,206	9,935	3,965	4,352	3500	21,808	23,936	53,846	OK
3	5,241	5,583	3,494	3,795	3500	19,217	20,873	53,846	OK
2	1,747	1,788	1,747	1,788	3500	9,609	9,834	53,846	OK

Berdasarkan pemeriksaan, nilai *inelastic drift* terbesar terjadi di lantai 4 dengan nilai arah X adalah 21,808 mm dan arah Y adalah 23,936 mm. Hasil yang didapatkan belum melewati nilai *drift limit* pada lantai tersebut yaitu 53,846 mm. Hasil tersebut dapat dilihat pada Gambar 6.

3.10. Kontrol Pengaruh P-Delta

Menurut SNI 1726:2019, *p-delta* merupakan efek dari deformasi struktur bangunan pada saat terkena beban gempa, yang dapat menyebabkan perubahan pada posisi beban gravitasi. Perubahan posisi beban gravitasi ini dapat menyebabkan tambahan momen dan gaya geser pada struktur bangunan. Pengaruh *p-delta* dapat menyebabkan peningkatan momen dan gaya geser pada struktur bangunan, sehingga perlu dipertimbangkan dalam analisis struktur bangunan untuk memastikan bahwa struktur bangunan dapat menahan beban gempa dengan aman. Simpangan

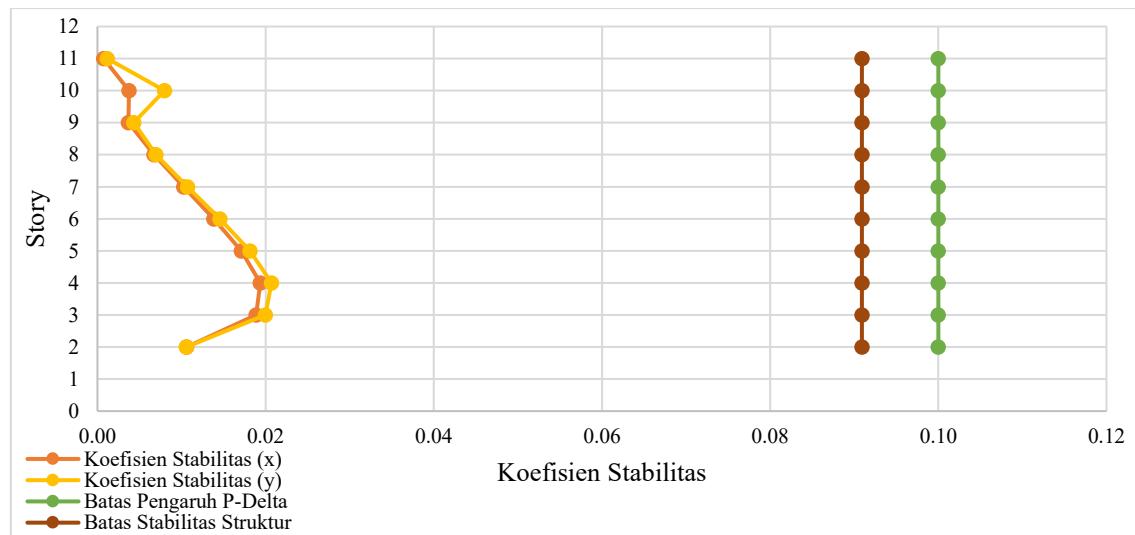
antar tingkat yang diakibatkan dari efek *p-delta* tidak perlu diperhitungkan bila koefisien stabilitas (θ) sama dengan atau kurang dari 0,10.



Gambar 6. Grafik Simpangan Antar Lantai
(Sumber: Software Excel)

Tabel 3. Kontrol Pengaruh *P-Delta*

Story	Inelastic Drift		Story Forces			<i>h</i>	Koefisien Stabilitas		Batas Pengaruh <i>P-Delta</i>	Batas Stabilitas Struktur, θ_{max}	Cek
	A_x	A_y	<i>P</i>	V_x	V_y		θX	θY			
	(mm)	(mm)	(kN)	(kN)	(kN)		(mm)				
11	2,805	4,724	1196,42	274,03	291,27	3000	0,0007	0,0012	0,1	0,0909	OK
10	5,440	12,122	3980,67	521,50	550,28	2000	0,0038	0,0080	0,1	0,0909	OK
9	8,003	9,603	20465,23	2300,18	2363,07	3500	0,0037	0,0043	0,1	0,0909	OK
8	11,391	12,144	55025,67	4845,58	4990,13	3500	0,0067	0,0070	0,1	0,0909	OK
7	15,345	16,462	89586,11	6957,18	7157,19	3500	0,0103	0,0107	0,1	0,0909	OK
6	18,744	20,262	124146,5	8736,39	8969,68	3500	0,0138	0,0146	0,1	0,0909	OK
5	21,142	23,012	158707,0	10193,3	10465,3	3500	0,0171	0,0181	0,1	0,0909	OK
4	21,808	23,936	193267,4	11303,0	11608,4	3500	0,0194	0,0207	0,1	0,0909	OK
3	19,217	20,873	227827,8	12048,6	12378,2	3500	0,0189	0,0200	0,1	0,0909	OK
2	9,609	9,834	262510,7	12356,0	12696,7	3500	0,0106	0,0106	0,1	0,0909	OK



Gambar 7. Grafik Koefisien Stabilitas
(Sumber: Software Excel)

Berdasarkan hasil pemeriksaan pengaruh *p-delta* terhadap arah X maupun arah Y, nilai koefisien stabilitas (θ) tidak melebihi nilai maksimum dan kurang dari 0,1. Maka, sesuai persyaratan tidak perlu diperhitungkan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dinamik pada struktur gedung apartemen 8 lantai dengan lokasi gempa di Kelurahan Tingkulu, Kec. Wanea, Kota Manado, Sulawesi Utara diperoleh kesimpulan, yaitu:

1. Hasil analisis periode fundamental struktur pada periode arah X adalah 1,041 detik dan periode Arah Y adalah 1,037 detik. Berdasarkan batas periode izin, bangunan gedung apartemen dinyatakan aman terhadap pengaruh gempa karena belum melewati periode maksimum T_{max} yaitu 1,309 detik.
2. Hasil ragam getar pada modal ke-13 sudah memenuhi persyaratan minimal 90% ragam getar struktur dari total keseluruhan partisipasi massa, dimana analisis modal yang dilakukan sudah mencakup sebagian besar respons dinamis struktur gedung apartemen. Didapati mode 1 adalah translasi arah X, mode 2 adalah translasi arah Y dan mode 3 adalah rotasi arah Z.
3. Perbandingan gaya geser dasar antara perhitungan manual dan perhitungan *ETABS* ditemukan hasil yang sama pada arah V_X dan V_Y yaitu 21.752,39 kN. Dengan demikian perhitungan gaya geser dinyatakan akurat dan struktur dapat menahan gaya geser yang terjadi pada dasar bangunan.
4. Berdasarkan analisis *story drift*, nilai *inelastic drift* terbesar terjadi di lantai 4 dengan nilai arah X adalah 21,808 mm dan arah Y adalah 23,936 mm. Berdasarkan nilai *drift limit* pada lantai 4 yaitu 53,846 mm bangunan gedung apartemen dinyatakan aman dalam pengaruh beban gempa.
5. Hasil analisis *p-delta* terbesar terjadi di lantai 4 dengan nilai koefisien stabilitas arah X adalah 0,0194 dan koefisien stabilitas arah Y adalah 0,0207. Berdasarkan batasan stabilitas struktur yaitu 0,0909 bangunan gedung apartemen dinyatakan aman dalam pengaruh gempa.

5. Saran

1. Untuk tahap awal perencanaan struktur gedung, perlu melakukan pemodelan awal untuk memilih dimensi elemen struktur seperti balok, kolom dan tebal pelat serta tata letak elemen struktur gedung. Pemilihan dimensi dan tata letak elemen struktur yang tepat dapat mengurangi kerusakan struktur akibat gempa, dimensi elemen struktur lebih efisien dan ekonomis.
2. Akibat yang terjadi jika gedung apartemen memiliki ketidakberaturan struktur adalah membuat eksentrisitas antara pusat massa terhadap pusatkekakuan tidak sama dan dapat menyebabkan kerusakan pada elemen struktur gedung apartemen ketika terjadi gempa bumi. Maka dari itu, untuk mengurangi dampak kerusakan elemen struktur dan mempermudah dalam perencanaan gedung apartemen, direkomendasikan untuk membuat pemisahan gedung (dilatasasi) menjadi beberapa bangunan apartemen, contohnya jika bentuk geometri struktur berbentuk huruf U dapat dibuat menjadi 3 bangunan apartemen, sehingga setiap bangunan-bangunan tersebut dapat berdefleksi secara bebas mengikuti periode alaminya dan mengurangi getaran akibat gempa bumi. Jarak dilatasasi ditentukan dari jumlah nilai *drift* yang timbul diperoleh dari hasil perpindahan pada program *ETABS*.
3. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk meninjau kembali pengaruh gempa sesuai lokasi dan fungsi gedung rencana. Tulangan struktur gedung dan pondasi perlu dirancang dan diperhitungkan. Untuk bentuk kolom dapat mencoba menggunakan bentuk yang bervariasi seperti kolom berbentuk persegi panjang atau kolom yang ukurannya beragam. Serta dapat mencoba menggunakan dinding geser untuk meningkatkan kekuatan dan kestabilan struktur.

Referensi

- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 1726:2019 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 2847:2019 Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *SNI 1727:2020 Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Clough, R. W., & Penzien, J. (1988). *Dinamika Struktur Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- CV. Bangun Bina Bersama. (2024). *Laporan Penyelidiki Tanah Pembangunan Gedung Poltekkes Tingkulu, Kec. Wanea*. Manado: CV. Bangun Bina Bersama.
- Kaligis, G. A., Windah, R. S., & Handono, B. D. (2024). Analisis Dinamis Chimney Beton Bertulang Akibat Variasi Percepatan Gempa. *TEKNO*, 22(88), 1491-1502.
- Lamia, N. T., Pandaleke, R. E., & Handono, B. D. (2020). Perencanaan Struktur Gedung Beton Bertulang dengan Denah Bangunan Berbentuk "L". *Jurnal Sipil Statik*, 8(4), 519-532.
- Murty , C. V., Goswami , R., Vijayanarayanan, A. R., & Mehta, V. V. (2012). *Some Concepts in Earthquake Behaviour of Buildings*. Gandhinagar: Gujarat State Disaster Management Authority (GSDMA), Government of Gujarat.
- Paz, M., & Kim, Y. H. (2018). *Structural Dynamics Theory and Computation Sixth Edition*. Louisville: Springer Nature Switzerland AG.
- Poluan, D. S., Pandaleke, R. E., & Dapas, S. O. (2019). Respons Dinamik Struktur Rangka Baja Menara Air dengan Variasi Elemen Pengaku Lateral. *Jurnal Sipil Statik*, 7(3), 367-378.
- Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN). (2022). *Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa*. Jakarta: Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan, Direktorat Jenderal Cipta Karya, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN), Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan, Direktorat Jenderal Cipta Karya, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2021). *Desain Spektra Indonesia*. Diambil kembali dari Aplikasi Spektrum Respons Desain Indonesia 2021: <https://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/>
- Roring, Y., Sumajouw, M. J., & Dapas, S. O. (2016). Respon Dinamis Struktur Bangunan Beton Bertulang Bertingkat Banyak dengan Kolom Berbentuk Pipih. *Jurnal Sipil Statik*, 4(10), 649-655.
- Salim, M. A., & Siswanto, A. B. (2018). *Rekayasa Gempa*. Yogyakarta: Penerbit K-Media.
- Schodek, D. L. (1999). *Struktur*. Jakarta: Erlangga.
- Siajaya, K., Windah, R. S., & Handono, B. D. (2018). Respons Struktur Gedung Bertingkat dengan Variasi Kekakuan Kolom Akibat Gempa Berdasarkan SNI 03-1726-2012. *Jurnal Sipil Statik*, 6(6), 411-422.
- Supit, N. A., Sumajouw, M. J., Tamboto, W. J., & Dapas, S. O. (2013). Respon Dinamis Struktur Bangunan Beton Bertulang Bertingkat Banyak dengan Variasi Orientasi Sumbu Kolom. *Jurnal Sipil Statik*, 1(11), 696-704.
- Tanauma, C., Windah, R. S., & Wallah, S. E. (2023). Analisa Dinamik Bangunan Bertingkat yang Memiliki Ketidakberaturan Horisontal Berbentuk T Akibat Gempa Berdasarkan SNI 1726:2019. *TEKNO*, 21(85), 957-968.
- Wiryadi, I. G., Wibawa, I. S., & Kusuma, I. J. (2022). Analisis dan Perilaku Dinamis Struktur Gedung A Fakultas Ekonomi Universitas Udayana Akibat Beban Gempa Riwayat Waktu. *Jurnal Ilmiah Kurva Teknik*, 11(1), 38-46.