

ANALISIS KINERJA SEISMIK STRUKTUR GEDUNG ENDO INDONESIA OFFICE SURABAYA TERHADAP KETIDAKBERATURAN STRUKTUR

Mohammad Tomita Maha Putra^{1*}, Krisnamurti², Erno Widayanto³

^{1,2,3}) Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jember
Jalan Kalimantan No. 37, Jember, Jawa Timur, 68121

^{*})email: 201910301024@mail.unej.ac.id

Diterima : 25 Januari 2024
Direvisi : 9 Mei 2024

Disetujui : 11 Mei 2024
Diterbitkan : 31 Mei 2024

Abstract: *The stability of a building structure relies on its ability to withstand both static and dynamic loads. Structural stability is influenced by geometry, the configuration of horizontal and vertical elements, stiffness, lateral capacity, and ductility. Irregular configurations can lead to structural eccentricity. If not anticipated, this condition can result in structural torsion and collapse. In Surabaya, there are offices with irregular structural layouts. Researchers modeled the building structures into five variations, each with reduced irregularity. Analysis results indicate that internal angle irregularities significantly affect roof displacements, with R-squared values of 0.9025 on the X-axis and 0.9872 on the Y-axis. Additionally, based on the stiffness values against seismic forces at each level, R-squared values of 0.8433 on the X-axis and 0.825 on the Y-axis were obtained. Consequently, irregularities in soft-story stiffness significantly influence seismic forces at each level. Furthermore, changes in internal angles result in successive increases in structural mass by 0.18%, 4.09%, 7.86%, and 0.43%. These increases lead to greater base shear forces. According to ASCE 41-13 NSP, the target displacements are 321.903 mm and 308.497 mm in the X and Y directions, respectively, meeting both life safety and immediate occupancy criteria. Meanwhile, the maximum total drift values according to ATC-40 in the X and Y directions are 0.0148 and 0.0150, respectively.*

Keywords : *Structural irregularities, Seismic performance, Pushover analysis, ETABS, Structural modeling*

Abstrak: Struktur bangunan akan stabil apabila respons struktur mampu mengabaikan beban statis dan dinamis. Kestabilan struktur dipengaruhi oleh geometri, konfigurasi elemen horizontal dan vertikal, kekakuan, kemampuan lateral, dan daktilitas struktur. Ketika konfigurasi struktur bangunan tidak teratur, akan terjadi eksentrisitas struktur. Apabila kondisi tersebut tidak diantisipasi, struktur dapat mengalami torsi hingga runtuh. Di Surabaya, terdapat gedung perkantoran yang memiliki ketidakberaturan struktur. Peneliti memodelkan struktur gedung menjadi lima variasi dengan pengurangan nilai ketidakberaturan struktur pada setiap variasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa ketidakberaturan sudut dalam memiliki signifikansi terhadap perpindahan atap, dengan R-square sebesar 0.9025 pada sumbu X dan 0.9872 pada sumbu Y. Selain itu, berdasarkan nilai kekakuan tingkat lunak terhadap gaya gempa pada setiap tingkat, didapat R-square sebesar 0.8433 pada sumbu X dan 0.825 pada sumbu Y. Kesimpulannya, ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak berpengaruh signifikan terhadap gaya gempa pada setiap tingkat. Selanjutnya, perubahan sudut dalam menyebabkan peningkatan massa struktur berturut-turut sebesar 0.18%, 4.09%, 7.86%, dan 0.43%. Peningkatan tersebut mengakibatkan peningkatan gaya geser dasar. Target perpindahan berdasarkan ASCE 41-13 NSP adalah 321.903 mm dan 308.497 mm untuk arah X dan Y. Keduanya masuk dalam kategori Life Safety dan Immediate Occupancy. Sementara itu, nilai maximum total drift berdasarkan ATC-40 arah X dan Y adalah 0.0148 dan 0.0150.

Kata kunci : Ketidakberaturan struktur, Kinerja seismik, Analisis beban dorong, Respons spektrum, ETABS, Pemodelan struktur

1. PENDAHULUAN

Struktur gedung akan stabil apabila respons dari struktur tersebut mampu mengabaikan beban-beban statis dan dinamis. Kestabilan perilaku struktur gedung juga dipengaruhi oleh geometri, konfigurasi elemen horizontal dan vertikal, kekakuan, kemampuan lateral,

dan daktilitas struktur[1]. Ketika konfigurasi struktur gedung tidak teratur, akan terjadi eksentrisitas yang artinya pusat massa tidak tepat berada pada pusat kekakuan [2]. Apabila kondisi tersebut tidak diantisipasi, struktur gedung akan mengalami torsi hingga pada akhirnya runtuh [3]. Gedung dengan struktur yang tidak

beraturan perlu diperhatikan kestabilan dan kinerja seismiknya, yang dipengaruhi oleh lokasi gedung terhadap wilayah rawan gempa [1]. Di Surabaya, terdapat gedung perkantoran yang memiliki geometri asimetris. Surabaya sendiri secara tektonik dan geologis, berada pada zona sesar aktif yaitu jalur zona Sesar Kendeng [4], sehingga sangat mungkin terjadi gempa. Berdasarkan data tersebut, perlunya analisis terhadap kinerja seismik yang bekerja pada gedung Endo Indonesia Office Surabaya.

Beberapa penelitian yang telah dilakukan oleh Rahmayanti & Labiba, Desimaliana, Bhosale, Khanal & Chaulagain, Hussain & Tengli, dan Khoirunnissa menganalisis kinerja seismik gedung yang memiliki ketidakberaturan horizontal model denah U, T, L, B, C, dan ketidakberaturan vertikal berupa setback yang berada di atas lantai dasar [1][5][6][7][8][9]. Gedung model L dalam penelitian Desimaliana memiliki simpangan rasio antara 1.2 dan 1.4 pada arah y, dianggap sebagai ketidakberaturan horizontal tipe 1a (ketidakberaturan torsi). Sedangkan gedung model C dalam penelitian Khoirunnissa menunjukkan ketidakberaturan sudut dalam sebesar 43% arah x dan 33% arah y, termasuk dalam kategori ketidakberaturan horizontal tipe 2. Hussain & Tengli juga melakukan analisis perbandingan antara gedung beraturan dan gedung model L yang tergolong sebagai ketidakberaturan horizontal tipe 2, dengan distribusi sebanyak 50% arah x dan 50% arah y.

Ketidaksimetrisan gedung Endo Indonesia Office Surabaya ini ditandai dengan adanya 2 coakan di ujung bangunan dan setback pada tingkat lantai tertentu yang perlu dicek pada SNI 1726 2019. Bentuk denah gedung Endo Indonesia Office Surabaya tidak bisa diasumsikan sebagai denah model U, T, L, B, dan C. Selain itu, gedung ini juga memiliki preliminary desain balok yang sangat bervariasi. Hal itu dikarenakan adanya penyesuaian dengan desain arsitektur dan *existing* lahannya.

Adapun beberapa persyaratan yang perlu diperiksa harus sesuai dengan SNI 1726 2019 yaitu ketidakberaturan horizontal tipe 1a (torsi), 1b (torsi berlebihan), 2 (sudut dalam), 3 (diskontinuitas diafragma), 4 (pergeseran tegak turus terhadap bidang), dan 5 (sistem nonparalel) [10][6]. Persyaratan ketidakberaturan vertikal harus sesuai dengan SNI 1726 2019 yaitu tipe 1a (soft *story*), 1b (excessive soft *story*), 2 (massa), 3 (geometri vertikal), 4 (diskontinuitas bidang), 5a (tingkat lemah akibat diskontinuitas), dan 5b (tingkat lemah berlebihan akibat diskontinuitas)[10]. Analisis tingkat kinerja dan pelayanan struktur akan ditentukan berdasarkan peraturan ASCE 41-13 NSP dan FEMA 440 EL. Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi tingkat kinerja dan pelayanan, gaya geser dasar (base shear), simpangan antar tingkat (*story drift*), dan perpindahan

antar tingkat (*story displacement*) dengan metode Performance Based Design (PBD) Analisis Respons Spektrum.

Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan analisis pengaruh variasi ketidakberaturan struktur terhadap kinerja struktur gedung dan juga tingkat pelayanan struktur gedung ditinjau berdasarkan base shear, *story drift*, *story displacement* akibat pengaruh ketidakberaturan struktur.

2. METODE PENELITIAN

Analisis Ketidakberaturan Struktur

Analisis ketidakberaturan struktur dihitung berdasarkan SNI 1726:2019, **Tabel 13** dan **Tabel 14**. Secara visual, struktur akan dicek terhadap ketidakberaturan torsi, sudut dalam, dan kekakuan tingkat lunak hingga dapat ditentukan kategori beraturan atau tidak beraturan secara horizontal maupun vertikal. [10].

Analisis Respons Spektrum

Respons spektrum merupakan metode analisis menggunakan spektrum gempa berupa grafik hubungan antara periode getar (T) dengan nilai percepatan bangunan saat diberi beban gempa. Respons spektrum dibagi menjadi 2 yaitu elastik dan inelastik. Metode analisis ini dipengaruhi oleh gaya gempa, periode getar, rasio redaman, daktilitas, serta kondisi tanah [10].

Apabila gaya geser dasar akibat seismik (V_t) < 100% dari gaya geser (V) dengan metode statik ekuivalen, maka skala gempa harus dikalikan dengan V/V_t , yang mana $V = C_s W$ [10].

a. Parameter Percepatan Gempa

Parameter percepatan gempa pada periode pendek S_s dan percepatan gempa pada periode 1 detik S_1 harus ditetapkan dengan kemungkinan 2% terlampaui dalam 50 tahun ($MCE_R, 2\%$ dalam 50 tahun). Penentuan respons spektrum percepatan gempa di permukaan tanah diperlukan faktor amplifikasi seismik periode 0.2 detik (F_a) dan 1 detik (F_v) sesuai (1) dan (2) berikut.

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (1)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (2)$$

Parameter koefisien situs F_a dan F_v ditentukan berdasarkan kelas situs tanah yang digunakan. Parameter percepatan S_{DS} dan S_{D1} ditentukan sesuai (3) dan (4).

$$S_{DS} = 2/3 S_{MS} \quad (3)$$

$$S_{D1} = 2/3 S_{M1} \quad (4)$$

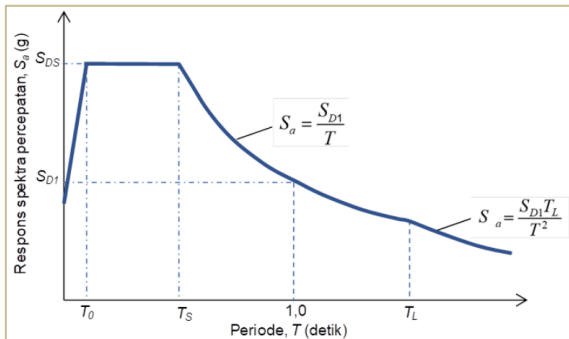
b. Parameter Spektrum Respons Desain

Perhitungan nilai T_0 , T_s , dan T_L sebagai berikut:

$$T_0 = 0,2 \cdot \frac{S_{D1}}{S_{DS}}; \quad (5)$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}; \quad (6)$$

T_L = Peta transisi periode panjang, ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Spektrum respons desain
 Sumber: SNI 1726 2019 [10]

Analisis Pushover

Analisis *pushover* atau beban dorong dilakukan untuk memperkirakan gaya maksimum dan deformasi yang terjadi akibat pembebanan lateral pada struktur. Pembebanan dilakukan secara bertahap ditingkatkan dengan faktor pengali. Hasil dari analisis ini berupa kurva kapasitas yang menghubungkan gaya geser dasar dengan perpindahan. Setelah *performance point* ditemukan, maka kinerja struktur dapat diketahui.

Metode Koefisien Perpindahan (ASCE 41-13 NSP)

Metode koefisien perpindahan adalah metode prosedur statik linier yang mengubah respons elastis linier dari sistem SDOF ekuivalen dengan faktor koefisien sesuai ASCE 41-13 NSP [11].

Metode Spektrum Kapasitas (FEMA 440 EL)

Metode spektrum kapasitas (*Capacity Spectrum Method*) merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengolah kurva kapasitas yang telah didapatkan sebelumnya dengan bantuan software analisis struktur [12].

3. HASIL PEMBAHASAN

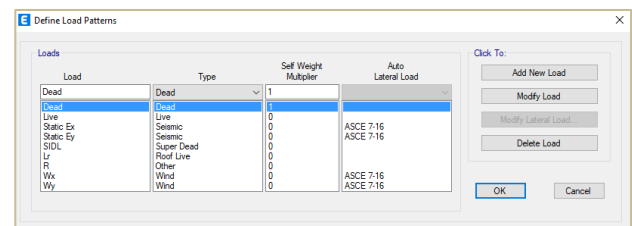
Preliminary dan Pemodelan Struktur

Desain Struktur utama (balok, kolom, dan pelat) mengacu pada *Detailed Engineering Drawing* dari perencana struktur. Gedung dimodelkan 5 jenis yaitu

Gedung V1, V2, V3, V4, dan V5. Perubahan denah dari V1 hingga V5 memerhatikan batasan luasan yang diizinkan serta bentuk lahannya, sehingga variasi yang dibuat, bisa diterapkan pada lahan *existing*. Dari Tabel 1, selisih luasan denah gedung variasi terhadap *existing* berturut-turut adalah 0%, -1.51%, +2.82%, +3.27%, dan -2.35%. Selain itu juga terdapat dimensi sudut dalam pada setiap variasi gedung yang nantinya akan dihitung pada bab ketidakberaturan struktur.

Tabel 1 Model variasi gedung

Model	2D Denah	3D ETABS	m ²	(%)
V1			885.3	0.00
V2			871.9	-1.51
V3			910.2	+2.82
V4			914.2	+3.27
V5			864.5	-2.3



Gambar 2 Jenis beban

Jenis beban yang dimasukkan ke dalam software ETABS dapat dilihat pada gambar di bawah. Beban

gempa dan beban angin mengacu pada SNI 1726:2019 dan SNI 1727:2020 (ASCE 7-16) dan PPIUG 1983 1727[13] [14] [15].

Gaya Geser Dasar

Gaya geser dasar hasil gempa dinamik harus lebih besar atau sama dengan gaya geser dasar hasil gempa

statik. Analisis menghasilkan perbedaan gaya geser dasar mengikuti perubahan massa struktur. Massa tiap variasi gedung dapat dilihat pada **Tabel 2**. Perbandingan gaya geser dasar 5 variasi gedung dan massa struktur tertera pada **Tabel 2** dan **Tabel 3**.

Tabel 2 Perbandingan massa struktur terhadap gedung V1

Gedung	Massa (kg)	% terhadap V1
V1	70751.37	0.00%
V2	70876.44	0.18%
V3	73642.16	4.09%
V4	76309.59	7.86%
V5	71058.85	0.43%

Sumber: Analisis ETABS V21

Tabel 3 Perbandingan gaya geser dasar terhadap gedung V1

Gedung	V_x (kN)	V_y (kN)	$V_{t,x}$ (kN)	$V_{t,y}$ (kN)	Cek $V_{t,x} \geq V_x$	Cek $V_{t,y} \geq V_y$	% $V_{t,x}$	% $V_{t,y}$
V1	3625.6	3625.6	3626.5	3627.0	OK	OK	0.00%	0.00%
V2	3632.0	3681.1	3647.8	3694.4	OK	OK	0.59%	1.86%
V3	3773.7	3824.4	3774.0	3824.6	OK	OK	4.07%	5.45%
V4	3910.4	3926.5	3913.3	3928.1	OK	OK	7.91%	8.30%
V5	3641.3	3641.3	3643.1	3643.6	OK	OK	0.46%	0.46%

Sumber: Analisis ETABS V21

Tabel 4 Perpindahan tiap lantai arah X

Story	V1	V2	V3	V4	V5
Lantai Atap Tangga	47.777	40.941	41.449	42.472	42.567
Lantai Atap	42.962	36.017	36.042	37.097	37.666
Lantai 6	39.733	32.47	32.526	33.55	33.815
Lantai 5	33.986	27.988	28.042	28.83	29.137
Lantai 4	25.195	21.4	21.474	22.101	22.276
Lantai 3	14.931	13.325	13.427	13.809	13.869
Lantai 2	5.111	4.925	4.988	5.143	5.077
Lantai 1	0	0	0	0	0

Sumber: Analisis ETABS V21

Tabel 5 Perpindahan tiap lantai arah Y

Story	V1	V2	V3	V4	V5
Lantai Atap Tangga	46.212	41.814	42.077	41.771	47.128
Lantai Atap	40.484	35.667	35.883	35.993	38.097
Lantai 6	36.435	30.629	30.903	31.002	33.471
Lantai 5	30.897	26.268	26.505	26.614	28.571
Lantai 4	22.946	20.05	20.299	20.376	21.845
Lantai 3	13.68	12.473	12.693	12.738	13.554
Lantai 2	4.781	4.617	4.727	4.754	4.937
Lantai 1	0	0	0	0	0

Sumber: Analisis ETABS V21

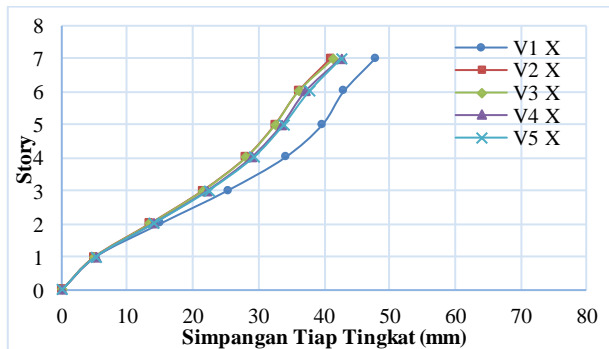
Semua variasi memiliki gaya geser dasar yang lebih tinggi dari pada struktur *existing*. Peningkatan gaya geser dasar ini disebabkan oleh peningkatan massa struktur

($V = C_s \cdot W$). **Tabel 3** menunjukkan peningkatan gaya geser tertinggi pada gedung V4 sebesar 3913.3 kN arah X dan 3928.1 kN arah Y.

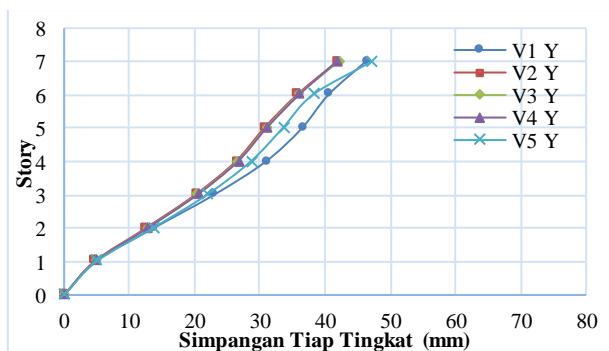
Perpindahan Atap

Perpindahan lantai pada tiap variasi terjadi penurunan terhadap gedung V1 (*existing*) tertera pada **Tabel 4** dan **Tabel 5**.

Tabel di atas menunjukkan reduksi simpangan tiap lantai. Gedung V1 lantai atap dengan simpangan arah X sebesar 42.962 mm dapat berkurang menjadi 36.017 mm. Perbandingan perpindahan lantai arah X dan Y dapat dilihat pada **Gambar 3** dan **Gambar 4**.



Gambar 3 Perbandingan perpindahan lantai arah X



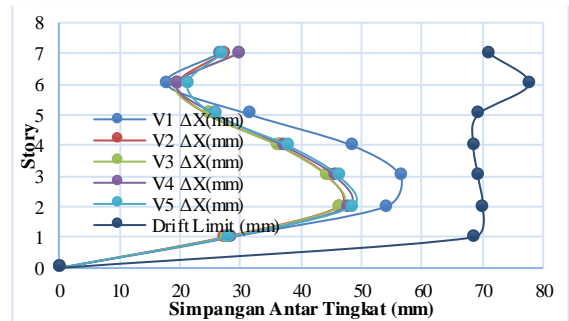
Gambar 4 Perbandingan perpindahan lantai arah Y

Gambar 3 dan **Gambar 4** menunjukkan perpindahan atap pada arah X dan Y gedung variasi 2, 3, 4, dan 5 rata-rata mengalami penurunan terhadap gedung existing. Gedung existing (V1) ditandai dengan garis warna biru muda sedangkan gedung V2 hingga V4 warna selain biru muda.

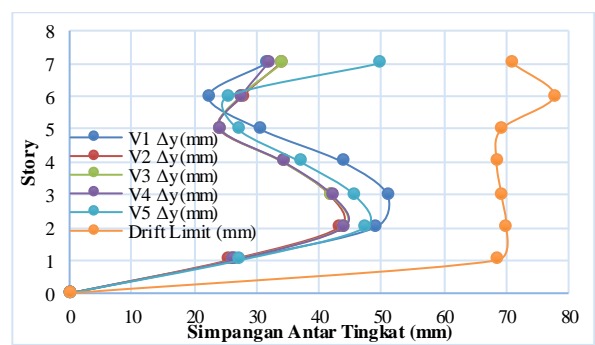
Garis warna oranye adalah simpangan antar tingkat arah X, garis warna biru adalah simpangan antar tingkat arah Y, sedangkan garis warna abu-abu adalah batas simpangan antar tingkat. Simpangan antar tingkat pada semua variasi masih di dalam batas simpangan izin. Warna biru menunjukkan simpangan arah X sedangkan warna oranye adalah simpangan arah Y. Grafik di atas selanjutnya diolah menjadi grafik kumulatif arah X dan arah Y seperti pada **Gambar 3** dan **Gambar 4**.

Gambar 3 dan **Gambar 4** pada kedua arah terlihat penurunan nilai *story drift*. Pada arah X struktur terlihat memiliki perubahan *story drift* tiap variasi yang lebih baik dari pada arah Y. Gedung V1

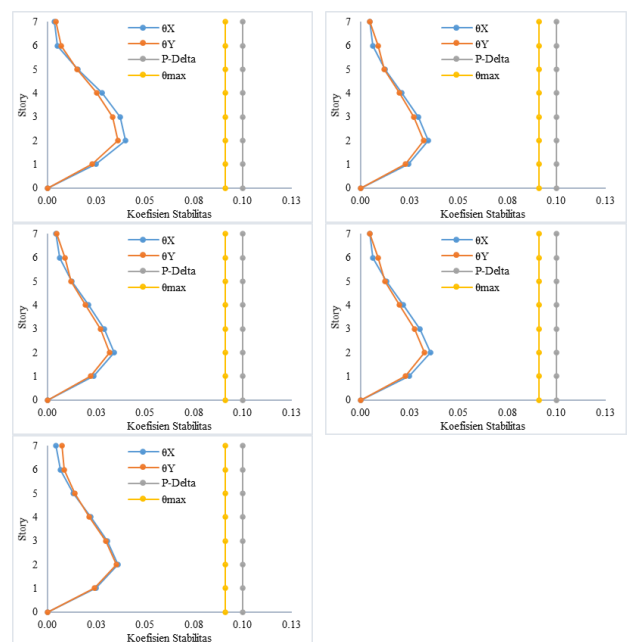
memiliki *story drift* terbesar. Semua variasi gedung terlihat masih berada di bawah batas izin simpangan antar tingkatnya. Lima variasi struktur gedung dapat dijadikan alternatif karena struktur aman terhadap pengaruh P-delta dan juga stabil secara struktural akibat beban gempa yang dapat dilihat pada **Gambar 5**, **Gambar 6**, dan **Gambar 7**.



Gambar 5 Perbandingan simpangan antar tingkat arah X



Gambar 6 Perbandingan simpangan antar tingkat arah Y



Gambar 7 Grafik simpangan terhadap P-Delta dan simpangan maksimum

Ketidakberaturan Horizontal

Pengecekan dilakukan berdasarkan nilai rasio simpangan maksimum dengan simpangan rata-rata tiap lantai, tertera pada Tabel 6.

Tabel 6 Rekapitulasi perhitungan ketidakberaturan torsi V1, V2, V3, V4, V5

Lantai	Rasio simpangan antar lantai tiap variasi (arah X)									
	V1	Cek	V2	Cek	V3	Cek	V4	Cek	V5	Cek
Lantai Atap Tangga	1.370	H.1a	1.495	H.1b	1.491	H.1b	1.466	H.1b	1.468	H.1b
Lantai Atap	1.660	H.1b	1.211	H.1a	1.213	H.1a	1.164	OK	1.166	OK
Lantai 6	1.089	OK	1.174	OK	1.183	OK	1.136	OK	1.138	OK
Lantai 5	1.085	OK	1.178	OK	1.189	OK	1.144	OK	1.148	OK
Lantai 4	1.093	OK	1.179	OK	1.189	OK	1.146	OK	1.151	OK
Lantai 3	1.106	OK	1.189	OK	1.194	OK	1.153	OK	1.157	OK
Lantai 2	1.125	OK	1.183	OK	1.181	OK	1.146	OK	1.155	OK

Sumber: Analisis ETABS V21

Lantai	Rasio simpangan antar lantai tiap variasi (arah Y)									
	V1	Cek	V2	Cek	V3	Cek	V4	Cek	V5	Cek
Lantai Atap Tangga	1.554	H.1b	1.614	H.1b	1.621	H.1b	1.623	H.1b	1.640	H.1b
Lantai Atap	1.760	H.1b	1.132	OK	1.129	OK	1.130	OK	1.187	OK
Lantai 6	1.090	OK	1.175	OK	1.160	OK	1.164	OK	1.085	OK
Lantai 5	1.103	OK	1.179	OK	1.163	OK	1.169	OK	1.085	OK
Lantai 4	1.155	OK	1.181	OK	1.166	OK	1.172	OK	1.086	OK
Lantai 3	1.204	H.1a	1.175	OK	1.164	OK	1.170	OK	1.086	OK
Lantai 2	1.130	OK	1.158	OK	1.149	OK	1.156	OK	1.088	OK

Sumber: Analisis ETABS V21

Ketidakberaturan torsi 1a terjadi jika rasionya lebih dari 1.2 dan kurang dari 1.4. Sedangkan ketidakberaturan torsi 1b jika rasionya lebih dari 1.4. Struktur yang lolos ketidakberaturan torsi ditandai dengan tidak adanya kode H.1a (ketidakberaturan horizontal tipe 1a) dan H.1b (ketidakberaturan horizontal tipe 1b).

Rasio sudut dalam pada kedua arah yang ditinjau tidak boleh kurang dari 15%. Hasil dapat dilihat pada Tabel 7.

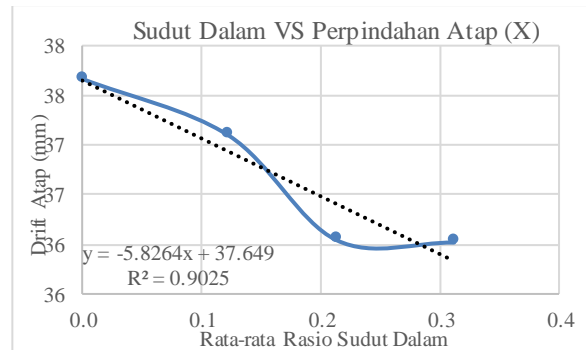
Tabel 7 Rekapitulasi perhitungan sudut dalam V1, V2, V3, V4, V5

Variasi	Lx	Px	Ly	Py	Px/Lx	Py/Ly	Cek	Avg x	Avg y
V1	32.05	7.59	38.64	28.26	0.237	0.731	H.2	0.323	0.465
	32.05	13.12	38.64	7.71	0.409	0.200	H.2		
V2	31.51	7.73	36.87	28.26	0.245	0.766	H.2	0.312	0.464
	31.51	11.93	36.87	5.99	0.379	0.162	H.2		
V3	31.51	7.73	36.87	28.26	0.245	0.766	H.2	0.213	0.464
	31.51	5.71	36.87	5.99	0.181	0.162	H.2		
V4	31.51	7.73	36.87	28.26	0.245	0.766	H.2	0.123	0.383
	31.51	0.00	36.87	0.00	0.00	0.00	OK		
V5	31.51	0.00	36.87	0.00	0.00	0.00	OK	0.000	0.000
	31.51	0.00	36.87	0.00	0.00	0.00	OK		

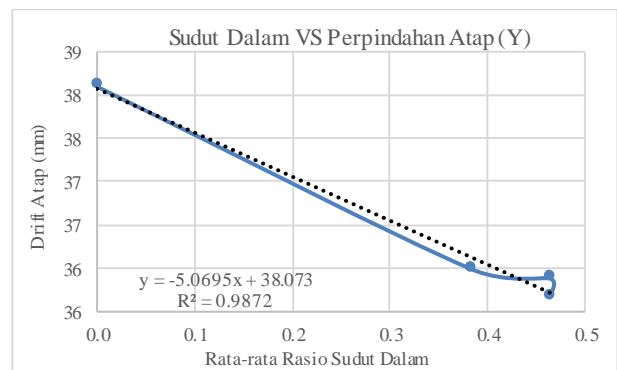
Sudut dalam pada desain gedung variasi (2, 3, 4, dan 5) memberikan implikasi pada *displacement* lantai atap. Nilai rasio sudut dalam rata-rata yang digunakan didapat dari hasil analisis ETABS. Hubungan antara dua nilai tersebut tertera pada Gambar 8 dan Gambar 9.

Gambar 8 menghasilkan *linear trendline* dengan nilai *R-square* sebesar 0.9025. Ditinjau pada arah X, semakin tinggi nilai rasi sudut dalam, maka nilai *displacement* arah tersebut akan semakin kecil. Nilai *R-square* 0.9025 mengindikasikan bahwa rasio sudut dalam memberikan pengaruh yang cukup kuat terhadap nilai *displacement* lantai atap [16].

Gambar 9 menghasilkan *linear trendline* dengan nilai *R-square* sebesar 0.9872. Ditinjau pada arah Y, semakin tinggi nilai rasi sudut dalam, maka nilai *displacement* arah tersebut akan semakin kecil. Nilai *R-square* 0.9872 mengindikasikan bahwa rasio sudut dalam memberikan pengaruh yang sangat kuat terhadap nilai *displacement* lantai atap [16].



Gambar 8 Pengaruh rasio sudut dalam terhadap perpindahan atap arah X (V2, V3, V4, V5)



Gambar 9 Pengaruh rasio sudut dalam terhadap perpindahan atap arah Y (V2, V3, V4, V5)

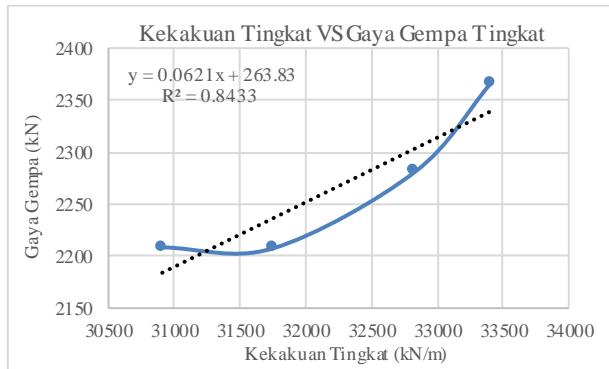
Ketidakberaturan Vertikal

Variasi sudut dalam pada gedung memberikan perubahan konfigurasi elemen vertikal seperti kolom. Hal tersebut akan memberikan implikasi pada kekakuan tiap tingkatnya. Pengaruh kekakuan tingkat akan berdampak pada gaya gempa tiap tingkat. Hubungan antara kekakuan tingkat dengan gaya gempa pada tingkat-tingkat struktur tertera pada Gambar 10 dan Gambar 11.

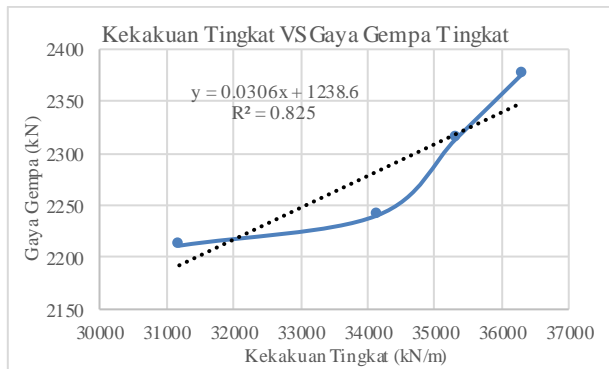
Grafik di atas menghasilkan *linear trendline* dengan nilai *R-square* sebesar 0.8433. Ditinjau pada arah X, semakin tinggi kekakuan tingkat, maka nilai gaya gempa tiap tingkat arah tersebut akan semakin tinggi. Nilai *R-square* 0.8433 mengindikasikan bahwa kekakuan tingkat memberikan pengaruh yang sangat kuat terhadap nilai gaya gempa tiap tingkat [16].

Gambar di atas menghasilkan *linear trendline* dengan nilai *R-square* sebesar 0.825. Ditinjau pada arah

Y, semakin tinggi kekakuan tingkat, maka nilai gaya gempa tiap tingkat arah tersebut akan semakin tinggi. Nilai *R-square* 0.825 mengindikasikan bahwa kekakuan tingkat memberikan pengaruh yang sangat kuat terhadap nilai gaya gempa tiap tingkat [16].



Gambar 10 Kekakuan tingkat rata-rata terhadap gaya gempa tingkat arah X (V2, V3, V4, V5)



Gambar 11 Kekakuan tingkat rata-rata terhadap gaya gempa tingkat arah Y (V2, V3, V4, V5)

Kinerja Struktur Gedung V1 (existing)

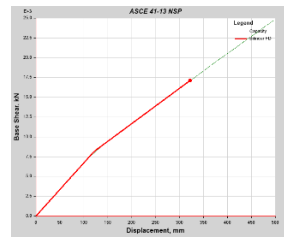
Analisis kinerja struktur dilakukan dengan metode *pushover analysis*. Analisis menghasilkan kurva kapasitas dan kurva permintaan yang nantinya didapat titik kinerja struktur dari perpotongan kurva tersebut. Dari kurva kapasitas didapat distribusi sendi plastis yang terjadi pada setiap iterasi atau step analisis *pushover*.

V_{leleh} terjadi pada step ke 5 yaitu 6433.6133 kN ditandai dengan 2 *joint* yang mengalami sendi plastis. Bangunan dapat dikatakan dalam kondisi elastis karena $V_{leleh} > V_{desain}$, 6433.6133 kN > 3626.505 kN. V_{leleh} juga terjadi pada step ke 5 yaitu 6353.0207 kN ditandai dengan 2 *joint* yang mengalami sendi plastis. Bangunan dapat dikatakan dalam kondisi elastis karena $V_{leleh} > V_{desain}$, 6353.0207 kN > 3626.959 kN, sebaliknya jika pada *joint* tersebut nilai $V_{leleh} < V_{desain}$ maka bangunan dalam keadaan plastis yang nantinya akan langsung runtuh.

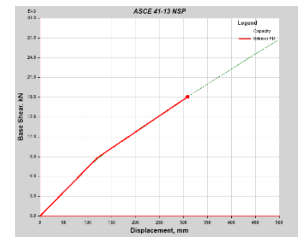
a. Metode Koefisien Perpindahan (ASCE 41-13 NSP)

Metode ini menghasilkan kurva *bilinear force*

displacement yang berwarna merah. Kurva ini diplot terhadap kurva kapasitas struktur yang dapat dilihat pada Gambar 12 dan Gambar 13.



Gambar 12 Kurva bilinear arah X gedung V1 (ASCE 41-13 NSP)



Gambar 13 Kurva bilinear arah Y gedung V1 (ASCE 41-13 NSP)

Dari grafik di atas didapat perhitungan parameter sesuai ASCE 41-13 NSP, tertera pada Tabel 8.

Tabel 8 Hasil perhitungan target perpindahan ASCE 41-13 NSP gedung V1

Parameter	Pushover X	Pushover Y	Satuan
C0	1.323779	1.34714	
C1	1	1	
C2	1	1	
Ti	1.619	1.522	sec
Te	1.619	1.522	sec
Ki	67036.892	74119.294	kN/m
Ke	67038.01	74125.904	kN/m
Sa	0.375511	0.400769	g
Alpha	0.667374	0.657644	
uStrength	3.29954	3.237992	
Dy	121.714	119.712	mm
Vy	8159.4336	8873.7857	kN
Weight	71695.2237	71695.2237	kN
Cm	1	1	
Target Displacement	321.903	308.497	mm
Base Shear	17115.8078	18076.7616	kN

Sumber: Analisis DCM ETABS V21

Tabel 9 Level kinerja (FEMA 356)

Parameter	Level Kinerja		
	IO	LS	CP
Struktur Beton	1%h _x	2%h _x	4%h _x
Struktur Baja	0.75%h _x	2.5%h _x	5%h _x

Dari Tabel 8 didapat nilai koefisien C0, C1, C2, dan sebagainya. Pada ETABS juga didapat perhitungan *target displacement* yang akan dicek level kinerjanya berdasarkan Tabel 9 FEMA 356.

1. Pushover Arah X

Berdasarkan Tabel 8 hasil analisis *pushover* pada ETABS, *target displacement* pada arah X didapat sebesar

321.903 mm. Nilai tersebut lebih dari $1\%h_x$ (321.23 mm) dan kurang dari $2\%h_x$ (642.4 mm) sehingga termasuk pada level *Life Safety*.

2. Pushover Arah Y

Berdasarkan **Tabel 8** hasil analisis *pushover* pada ETABS, *target displacement* pada arah Y didapat sebesar 308.497 mm. Nilai tersebut kurang dari $1\%h_x$ (321.23 mm) sehingga termasuk pada level *Immediate Occupancy*.

Hasil perhitungan metode ASCE 41-13 NSP, dapat

disimpulkan struktur masih mampu menahan beban gempa yang terjadi karena nilai simpangan lantai atap kurang dari simpangan izin.

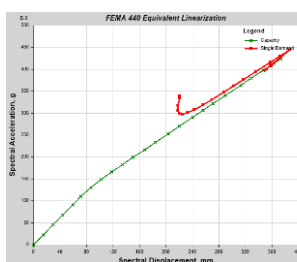
b. Metode Spektrum Kapasitas (*FEMA 440 EL*)

Titik kinerja bangunan dapat diketahui melalui perpotongan antara kurva kapasitas dengan kurva permintaan. Kurva didapat dari metode FEMA 440 EL pada ETABS seperti pada **Tabel 10**. Titik kinerja dapat dilihat pada Error! Reference source not found. dan **Gambar 15**.

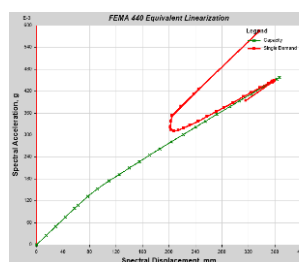
Tabel 10 Nilai kurva kapasitas dan kurva permintaan gedung V1

Step Number	Pushover X				Pushover Y			
	Capacity Curve		Demand Curve		Capacity Curve		Demand Curve	
	Sd (mm)	Sa (g)	Sd (mm)	Sa (g)	Sd (mm)	Sa (g)	Sd (mm)	Sa (g)
1	0.000	0.000	220.757	0.339	0.000	0.000	204.361	0.355
2	14.759	0.023	220.757	0.339	14.418	0.025	204.361	0.355
3	29.519	0.045	220.757	0.339	28.836	0.050	237.173	0.412
4	44.278	0.068	220.757	0.339	43.245	0.075	218.304	0.379
5	59.045	0.091	220.757	0.339	57.661	0.100	336.177	0.584
6	71.597	0.110	220.757	0.339	62.435	0.108	244.813	0.425
7	86.520	0.131	220.729	0.334	77.085	0.132	204.910	0.352
8	101.903	0.149	218.143	0.318	92.158	0.153	202.915	0.338
9	117.964	0.166	217.806	0.306	109.171	0.174	201.839	0.322
10	134.326	0.183	220.066	0.299	124.420	0.192	203.371	0.314
11	150.181	0.199	224.844	0.298	139.758	0.210	207.428	0.311
12	167.763	0.217	232.859	0.301	155.213	0.227	213.753	0.313
13	183.953	0.234	242.348	0.308	170.938	0.245	222.227	0.319
14	203.207	0.253	255.796	0.319	185.814	0.262	231.608	0.327
15	220.121	0.270	269.560	0.331	203.416	0.282	243.837	0.338
16	240.186	0.291	287.494	0.348	221.410	0.302	257.316	0.350
17	255.676	0.306	302.212	0.362	240.143	0.322	271.434	0.364
18	270.724	0.321	316.852	0.376	254.786	0.338	282.885	0.375
19	289.577	0.340	335.365	0.394	271.987	0.357	296.788	0.389
20	312.432	0.364	357.532	0.416	291.695	0.378	312.619	0.405
21	328.048	0.379	371.829	0.430	306.332	0.394	324.056	0.417
22	346.520	0.398	386.979	0.444	324.577	0.413	337.478	0.430
23	363.582	0.414	348.585	0.397	344.395	0.435	350.327	0.442
24	373.193	0.424	351.819	0.399	362.569	0.453	359.211	0.449
25					366.420	0.457	316.176	0.395

Sumber: Analisis CSM ETABS V21



Gambar 14 Titik kinerja arah X gedung V1 (FEMA 440 EL)



Gambar 15 Titik kinerja arah Y gedung V1 (FEMA 440 EL)

Dari **Tabel 10** di atas, didapat titik kinerja struktur yang dapat dilihat pada **Gambar 14** dan **Gambar 15**. Pada ETABS didapat *calculate parameters* untuk menentukan level kinerja struktur seperti tertera pada **Tabel 11**. Dari **Tabel 11**, level kinerja struktur dalam setiap arah yang ditinjau akan dihitung dan disesuaikan dengan *performance level ATC-40* [17] pada **Tabel 12**. Perhitungan level kinerja dihitung berdasarkan simpangan maksimum seperti tertera pada **Tabel 13**.

Tabel 13 menunjukkan level kinerja yang didapat, struktur berada antara titik B ke C dengan level *damage control* di kedua arah. Sendi plastis tertera pada **Gambar 16** dan **Gambar 17**. Terlihat bahwa adanya perbedaan

antara pushover X dengan pushover Y yaitu pada pushover X sendi plastis berada pada level IO to LS (B to C), pada pushover Y terdapat sendi plastis yang berada pada level IO to LS (B to C) dan hanya ada 1 kolom praktis yang berada pada level > CP (C to D).

Tabel 11 Hasil perhitungan parameter FEMA 440 EL gedung V1

Parameter	Pushover X	Pushover Y	Satuan
Shear	23802.7414	25958.8183	
Displacement	475.171	480.66	
Sa	0.409498	0.446705	
Sd	358.608	356.105	
T secant	1.878	1.791	sec
T effective	2.741	2.681	sec
Kductility Ratio	3.959345	3.934179	
Effective Damping	0.1978	0.1938	
Modification Factor	2.13183	2.239457	

Sumber: Analisis CSM ETABS V21

Tabel 12 Level kinerja (ATC-40)

Inter-story drift Limit	Performance Level			
	Immediate Occupancy	Damage Control	Life Safety	Structural Stability
Maximum Total Drift	0.01	0.01 - 0.02	0.02	0.33 Vi/Pi
Maximum Inelastic Drift	0.005	0.005-0.015	no limit	no limit

Tabel 13 Perhitungan level kinerja struktur (ATC 40)

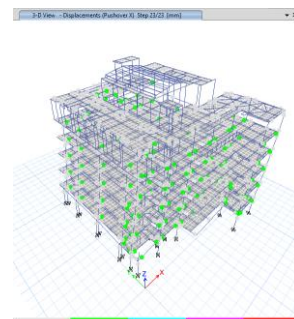
Pushover	Analisis	Hasil	Level Kinerja
Arah X	$\Delta_{max} = \frac{D_t}{h} = \frac{475.171}{32120}$	0.0148	Titik B ke C (Damage Control)
Arah Y	$\Delta_{max} = \frac{D_t}{h} = \frac{480.66}{32120}$	0.0150	Titik B ke C (Damage Control)

4. KESIMPULAN DAN SARAN

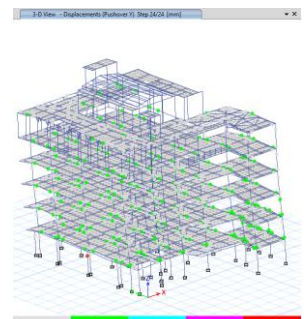
Kesimpulan

Struktur existing memiliki ketidakberaturan torsi, sudut dalam, dan kekakuan tingkat lunak. Gedung variasi 2, 3, 4, dan 5 menunjukkan penurunan nilai ketidakberaturan horizontal dan

vertikal. Berdasarkan nilai ketidakberaturan sudut dalam terhadap perpindahan atap, didapat *R-square* 0.9025 arah X, dan 0.9872 arah Y. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa ketidakberaturan sudut dalam memiliki dampak yang signifikan pada perpindahan lantai. Berdasarkan nilai kekakuan tingkat lunak terhadap gaya gempa tiap tingkat, didapat *R-square* 0.8433 arah X dan 0.825 arah Y. Dapat disimpulkan bahwa ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak berpengaruh signifikan terhadap gaya gempa tiap tingkatnya. Perubahan sudut dalam pada variasi 2, 3, 4, dan 5 mengakibatkan perubahan luas bangunan sehingga massa struktur juga berubah. Perubahan berturut-turut sebesar 0.18%, 4.09%, 7.86%, 0.43%. Peningkatan tersebut mengakibatkan meningkatnya gaya geser dasar pada kedua arah. Gedung variasi 5 yang didesain tanpa adanya sudut dalam, memiliki nilai peningkatan gaya geser dasar yang sama pada kedua arah sebesar 0.46% arah X dan Y.



Gambar 16 Sendi plastis akibat pushover arah X step 23/23 gedung V1



Gambar 17 Sendi plastis akibat pushover arah Y step 24/24 gedung V1

Target perpindahan berdasarkan ASCE 41-13 NSP arah X dan Y adalah 321.903 mm dan 308.497 mm termasuk pada kategori level *Life Safety* dan *Immediate Occupancy*. Nilai maximum total drift berdasarkan ATC-40 arah X dan Y adalah 0.0148 dan 0.0150. Kinerja struktur gedung existing berada antara titik B ke C pada level *damage control (Immediate Occupancy to Life Safety)* yang artinya gedung mengalami kerusakan minor nonstruktural dan dapat mengalami kerusakan struktural namun masih dapat diperbaiki.

Saran

Analisis kinerja dapat dilanjutkan hingga pada tahap gaya dalam elemen struktural untuk membandingkan besaran gaya dalamnya sehingga dapat diketahui apakah dapat menekan kebutuhan tulangan atau sebaliknya. Dapat dicoba analisis menggunakan metode *dynamic time history analysis*.

Untuk mendapatkan gaya gempa yang mendekati nilai sesungguhnya sesuai riwayat gempa disekitar lokasi gedung.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Khanal dan H. Chaulagain. 2020. *Seismic Elastic Performance of L-Shaped Building Frames Through Plan Irregularities*. Structures, vol. 27, hlm. 22–36, doi: [10.1016/j.istruc.2020.05.017](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.05.017).
- [2] A. Faisal dan A. P. Darsono. 2019. *Perilaku Nonlinear Struktur Gedung Baja dengan Bentuk Denah L, T dan U Akibat Gempa*. Progress in Civil Engineering Journal, vol. 1, no. 1, hlm. 63–73, Diakses: 7 Mei 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://jurnal.umsu.ac.id/index.php/PCEJ/article/view/3283>
- [3] S. E. Naveen, N. M. Abraham, dan A. K. S. D. 2019. *Analysis of Irregular Structures under Earthquake Loads* dalam Procedia Structural Integrity, Bangalore, India: Elsevier B.V., hlm. 806–819. doi: [10.1016/j.prostr.2019.07.059](https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.059).
- [4] Humas BMKG. 2018. *Penjelasan BMKG Mengenai Ramalan Gempa Surabaya - Madura | BMKG*. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. Diakses: 6 Mei 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.bmkg.go.id/press-release/?p=penjelasan-bmkg-mengenai-ramalan-gempa-surabaya-madura&tag=press-release&lang=ID>
- [5] N. Rahmayanti dan H. Y. Labiba. 2021. *Evaluasi Kinerja Gedung Apartemen 10 Lantai dengan Ketidakberaturan Horizontal*. Semesta Teknika, vol. 24, no. 1, hlm. 23–33, doi: [10.18196/st.v24i1.11676](https://doi.org/10.18196/st.v24i1.11676).
- [6] E. Desimaliana, N. V. Diredja, dan R. Syahputra. 2022. *Analisis Pushover terhadap Ketidakberaturan Horizontal pada Struktur Gedung Baja Komposit*. RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil, vol. 08, no. 02, hlm. 118–124, doi: [10.26760/rekaracana](https://doi.org/10.26760/rekaracana).
- [7] A. S. Bhosale, R. Davis, dan P. Sarkar. 2018. *Seismic Safety of Vertically Irregular Buildings: Performance of Existing Indicators*. Journal of Architectural Engineering, vol. 24, no. 3, doi: [10.1061/\(asce\)ae.1943-5568.0000319](https://doi.org/10.1061/(asce)ae.1943-5568.0000319).
- [8] S. M. Hussain dan S. K. Tengli. 2018. *Study on Torsional Effects of Irregular Buildings Under Seismic Loads*. International Journal of Applied Engineering Research, vol. 13, no. 7, hlm. 55–60, [Daring]. Tersedia pada: <http://www.ripublication.com>
- [9] U. Khoirunnissa, R. Djakfar, dan Y. Setiawan. 2020 “*Analisis Dinamik Respon Struktur Gedung Beraturan dan Ketidakberaturan Horizontal*,” Maret, vol. 2, no. 1, hlm. 59–68, doi: [10.32722/cmj.v2i1.2758](https://doi.org/10.32722/cmj.v2i1.2758).
- [10] BSN, SNI 1726:2019. 2019. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung*. ASCE 41-13. 2014. *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. doi: [10.1061/9780784412855](https://doi.org/10.1061/9780784412855).
- [11] FEMA 440. 2005. *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*.
- [12] BSN, SNI 1727:2020. 2020. *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait Untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*.
- [13] Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan. 1983. *Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung 1983*, vol. 1. Bandung: Yayasan Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan.
- [14] N. A. Attathira, Wahiddin, dan A. D. Lestari. 2022. *Pengaruh Ketidakberaturan Vertikal Tingkat Lunak dan Massa Terhadap Gedung Bertingkat Akibat Beban Gempa Berdasarkan SNI-1726-2019 – MRK*. Jurnal Online Skripsi, vol. 3, no. 3, hlm. 142–146, Diakses: 21 Januari 2024. [Daring]. Tersedia pada: <http://jos-mrk.polinema.ac.id/>
- [15] Sugiyono. 2013. *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*, 19 ed. Bandung: ALFABETA. Diakses: 21 Januari 2024. [Daring]. Tersedia pada: www.cvalfabet.com
- [16] ATC 40. 1996. *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, vol. 1. California