

Analisis Struktur Gedung 2D dengan Ketidakberaturan Vertikal Menggunakan Metode Nonlinear Pushover

Palentino Saputra Hutabalian¹, *Samsul Abdul Rahman Sidik Hasibuan²

^{1,2}Program Studi Teknik Sipil Universitas Medan Area; Kampus 1. Jalan Kolam Nomor 1 Medan Estate / Jalan Gedung PBSI, Medan 20223, Indonesia

ARTICLE INFORMATION

Received: February 19, 2025
 Revised: March 27, 2025
 Accepted: March 30, 2025
 Available online: April 30, 2025

KEYWORDS

vertical irregularity, nonlinear pushover, SAP2000, story displacement, story drift, earthquake.

* CORRESPONDENCE

E-mail: samsulrahman@staff.uma.ac.id

A B S T R A C T

Multi-story buildings with vertical irregularities often experience uneven load distribution, which can affect the structural performance under lateral loads, especially seismic forces. Such irregularities, such as varying column and beam dimensions between floors, can lead to significant increases in displacement and deformation on the upper floors compared to the lower floors. Therefore, it is important to evaluate the impact of vertical irregularities on the structure's behavior to ensure building safety. This study aims to analyze the impact of vertical irregularity on the behavior of multi-story buildings using the nonlinear pushover method. The analysis was performed using SAP2000 software to assess the structural capacity to withstand lateral loads, particularly seismic loads. The results show a linear relationship between story displacement and lateral forces ($R^2 = 0.8342$), as well as the impact of vertical irregularities that increase story drift and Story drift ratio on the upper floors. Structures with a Story drift ratio exceeding the earthquake design standard limits may affect the stability of the structure. Furthermore, this study shows that vertical irregularity can cause significant differences in forces on columns and beams between the lower and upper floors, increasing the risk of structural failure. Based on these findings, it is recommended to consider vertical irregularities in the design of multi-story buildings to ensure structural resilience against seismic loads, by accounting for a more uniform distribution of forces throughout the building.

1. PENDAHULUAN

Dalam perancangan struktur gedung, terutama gedung bertingkat tinggi, penting untuk mempertimbangkan ketidakberaturan vertikal yang sering terjadi pada bangunan. Ketidakberaturan vertikal merujuk pada variasi ukuran atau dimensi elemen struktur seperti kolom dan balok yang dapat mempengaruhi distribusi beban dan kinerja struktur. Fenomena ini sering kali dihadapi pada gedung bertingkat dengan fungsi ruang yang berbeda pada setiap lantai, yang dapat menyebabkan perubahan dimensi kolom dan balok seiring dengan bertambahnya tinggi bangunan [1,2]. Meskipun desain struktur umumnya mempertimbangkan beban vertikal dan lateral, ketidakberaturan vertikal sering kali menjadi faktor yang kurang diperhatikan dalam perencanaan, padahal dapat berpengaruh signifikan terhadap stabilitas dan keamanan gedung, terutama di bawah beban gempa [3,4].

Masalah utama yang dihadapi dalam penelitian ini adalah bagaimana menganalisis dampak ketidakberaturan vertikal terhadap perilaku struktur gedung bertingkat tinggi. Gedung dengan ketidakberaturan vertikal rentan terhadap redistribusi gaya dan perubahan pola perpindahan, yang dapat menyebabkan peningkatan deformasi atau bahkan kegagalan struktural pada bagian tertentu [5,6]. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang tepat dalam menganalisis dan merancang gedung dengan ketidakberaturan vertikal agar struktur dapat bertahan terhadap beban lateral seperti gempa [7].

Salah satu isu utama dalam desain gedung bertingkat adalah bagaimana menganalisis pengaruh ketidakberaturan vertikal pada perilaku struktural gedung tersebut. Ketidakberaturan ini bisa berupa variasi dimensi kolom dan balok pada setiap lantai atau perubahan fungsi ruang yang mengharuskan perubahan dimensi elemen struktural [8,9]. Isu ini semakin penting dengan adanya peningkatan penggunaan teknik analisis nonlinear untuk menilai respons struktur terhadap beban dinamis seperti gempa [10]. Penggunaan metode seperti *pushover* nonlinear memungkinkan analisis yang lebih realistis terhadap perilaku struktur di bawah beban lateral, yang tidak dapat dicapai dengan pendekatan linier tradisional [11,12].

Selain itu, distribusi gaya gempa pada struktur gedung yang tidak simetris atau tidak beraturan secara vertikal dapat menyebabkan perbedaan besar dalam momen lentur, gaya geser, dan perpindahan antar lantai [13,14]. Oleh karena itu, ketidakberaturan vertikal harus dipertimbangkan secara mendalam dalam desain dan analisis struktur untuk memastikan ketahanan bangunan terhadap bencana alam seperti gempa bumi [15].

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas pengaruh ketidakberaturan vertikal terhadap kinerja struktur gedung. Penelitian oleh Zhou et al. (2018) membahas pengaruh ketidakberaturan vertikal terhadap respons struktur gedung bertingkat tinggi di bawah beban gempa [16]. Mereka menunjukkan bahwa ketidakberaturan vertikal dapat menyebabkan perubahan signifikan pada distribusi gaya gempa, yang mengarah pada peningkatan deformasi dan potensi kegagalan struktural pada lantai-lantai atas yang memiliki dimensi kolom lebih kecil [17,18]. Dalam penelitian tersebut, metode *pushover* nonlinear digunakan untuk menganalisis kinerja struktur dengan ketidakberaturan vertikal, yang menunjukkan hasil yang lebih akurat dalam memprediksi perilaku struktur dibandingkan dengan metode linier tradisional [19].

Penelitian lain oleh Chen et al. (2020) juga mengkaji dampak ketidakberaturan vertikal pada distribusi gaya lateral pada gedung bertingkat [20]. Mereka menemukan bahwa ketidakberaturan vertikal dapat menyebabkan perbedaan besar dalam gaya aksial dan momen pada kolom, yang meningkatkan risiko keruntuhan pada struktur. Penelitian tersebut mendorong penggunaan analisis nonlinear untuk mengevaluasi kinerja gedung dengan ketidakberaturan vertikal, terutama dalam konteks gempa [21,22].

Namun, meskipun banyak penelitian yang telah membahas ketidakberaturan vertikal pada gedung bertingkat tinggi, masih terdapat kekurangan dalam hal metode yang lebih tepat untuk analisis gedung dengan ketidakberaturan vertikal menggunakan software analisis struktural modern [23,24]. Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kekurangan tersebut dengan menggunakan SAP2000 dan metode nonlinear *pushover*, yang dapat memberikan gambaran yang lebih jelas dan akurat mengenai perilaku struktur gedung bertingkat dengan ketidakberaturan vertikal di bawah beban gempa [25].

Melalui penelitian ini, diharapkan dapat ditemukan solusi untuk meningkatkan keamanan dan ketahanan struktur gedung bertingkat tinggi dengan ketidakberaturan vertikal, serta memberikan kontribusi bagi pengembangan metode perancangan yang lebih efektif dalam menghadapi tantangan ini [26,27].

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku struktur gedung bertingkat 2D dengan ketidakberaturan vertikal menggunakan metode nonlinear *pushover*. Pemodelan struktur akan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak SAP2000, yang memungkinkan analisis mendalam terhadap distribusi gaya dan deformasi struktur yang terjadi di bawah beban gempa.

2.1 Geometri Struktur

Struktur yang dianalisis adalah gedung bertingkat dengan total tinggi 15 meter, terdiri dari lima lantai yang masing-masing memiliki tinggi 3 meter. Gedung ini menggunakan kolom dan balok

dengan dimensi yang bervariasi di setiap lantai, menciptakan ketidakberaturan vertikal. Penampang kolom dan balok untuk masing-masing lantai ditampilkan pada Tabel 1.

2. 2 Pemberian Beban

Beban yang diterapkan pada struktur mencakup beban mati, beban hidup, dan beban lateral:

- Beban Mati sebesar $3,75 \text{ kN/m}^2$ pada seluruh lantai, yang mencakup berat elemen struktur dan elemen permanen lainnya.
- Beban Hidup sebesar 4 kN/m^2 , yang mengacu pada beban yang dapat berubah sesuai dengan penggunaan ruang.
- Beban Lateral sebesar 1000 kN , yang diterapkan pada titik sambungan antara kolom dan balok di seluruh lantai untuk mensimulasikan beban gempa yang bekerja pada struktur. Beban lateral sebesar 1000 kN diterapkan pada seluruh lantai sebagai nilai asumsi untuk analisis struktur. Nilai ini ditetapkan oleh penulis sebagai pendekatan untuk mengevaluasi respons struktur terhadap gaya lateral tanpa mengacu pada perhitungan spesifik berdasarkan standar tertentu. Meskipun demikian, dalam perencanaan struktur nyata, penentuan beban lateral biasanya mengacu pada standar seperti SNI 1726:2019 atau ASCE 7-16, yang mempertimbangkan parameter seismik lokasi, massa struktur, serta faktor reduksi gempa.

Tabel 1. Detail kolom dan balok

Lantai	Elemen	Dimensi (cm)	Jumlah Batang Longitudinal	Ukuran Batang Longitudinal (mm)	Keterangan
1	Kolom	40 x 40	8	D16	4 batang di setiap sisi
1	Balok	30 x 50	6 atas, 4 bawah	D16 atas, D13 bawah	Tulangan geser Ø8-150
2	Kolom	30 x 30	8	D16	4 batang di setiap sisi
2	Balok	25 x 50	4 atas, 2 bawah	D16 atas, D13 bawah	Tulangan geser Ø8-150
3	Kolom	25 x 25	8	D13	4 batang di setiap sisi
3	Balok	20 x 50	4 atas, 2 bawah	D13 atas, D13 bawah	Tulangan geser Ø8-200
4	Kolom	20 x 20	4	D13	2 batang di setiap sisi
4	Balok	20 x 40	4 atas, 2 bawah	D13 atas, D10 bawah	Tulangan geser Ø8-200
5	Kolom	15 x 15	4	D10	2 batang di setiap sisi
5	Balok	15 x 40	2 atas, 2 bawah	D10 atas, D10 bawah	Tulangan geser Ø8-250

2. 3 Analisis Nonlinear Pushover

Analisis *pushover* dilakukan untuk mengevaluasi kapasitas struktur dalam menahan beban lateral secara bertahap hingga mencapai kondisi kegagalan. Pola pembebanan yang digunakan adalah distribusi segitiga (*triangular load pattern*) sesuai dengan mode fundamental struktur. Pendekatan kontrol yang diterapkan dalam analisis ini adalah *displacement control*, di mana perpindahan target ditentukan berdasarkan perpindahan atap hingga mencapai kondisi tertentu.

Jenis sendi plastis yang digunakan dalam pemodelan adalah sendi plastis momen-rotasi (*moment-rotation plastic hinge*) yang mengacu pada kriteria FEMA 356 dan ATC-40. Kriteria kegagalan struktur ditentukan berdasarkan kondisi IO (*Immediate Occupancy*), LS (*Life Safety*), dan CP (*Collapse Prevention*), di mana struktur dianggap gagal apabila mengalami perpindahan

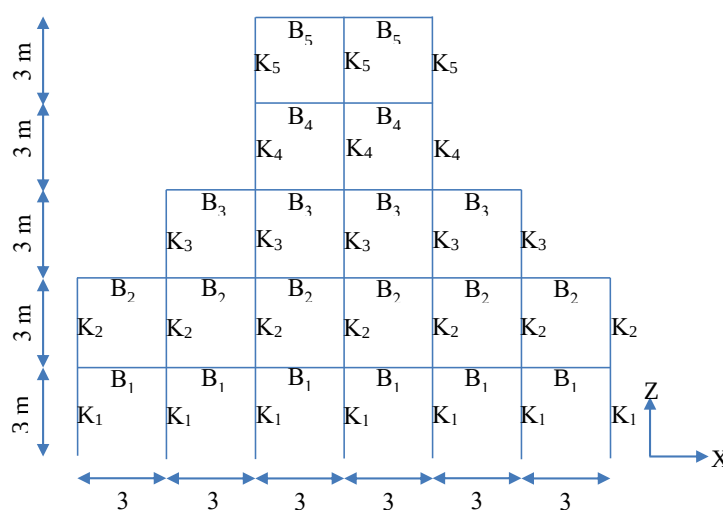
melebihi batas CP atau terjadi penurunan kapasitas beban yang signifikan.

Analisis *pushover* nonlinier merupakan metode yang digunakan untuk mengevaluasi kapasitas struktur gedung dalam menahan beban lateral yang meningkat secara bertahap hingga struktur mencapai titik kegagalan. Proses ini penting untuk memahami bagaimana sebuah struktur akan merespon beban gempa yang diterapkan. Pada analisis ini, dilakukan peningkatan beban lateral secara bertahap pada struktur, yang kemudian menghasilkan kurva *pushover*. Kurva ini menggambarkan hubungan antara displacement (perpindahan) struktur dan *base force* (gaya dasar) yang diterima oleh struktur. Kurva *pushover* ini memberikan wawasan mengenai kapasitas deformasi dan kekuatan struktur saat menghadapi beban lateral, yang pada akhirnya dapat digunakan untuk menilai kinerja gedung di bawah kondisi gempa.

Langkah pertama dalam analisis *pushover* adalah penambahan beban lateral secara bertahap pada struktur. Beban lateral ini diterapkan dari awal hingga mencapai titik kegagalan, yang berarti struktur telah mengalami deformasi permanen. Pada tahap ini, titik-titik tertentu pada struktur akan menunjukkan perubahan perilaku, dan sendi plastis mulai terbentuk. Identifikasi titik-titik ini sangat penting karena menunjukkan area yang akan mengalami kerusakan atau kehilangan kekuatan. Deformasi plastis tersebut menjadi indikasi adanya kegagalan struktural pada bagian tertentu dari gedung, seperti pada kolom atau balok.

Hasil dari analisis *pushover* nonlinier ini memberikan gambaran yang lebih mendalam mengenai perilaku struktur gedung dengan ketidakberaturan vertikal. Ketidakberaturan vertikal dapat menyebabkan distribusi gaya gempa yang tidak merata pada struktur, yang akan mempengaruhi kemampuan struktur dalam menahan beban gempa. Oleh karena itu, analisis ini juga memberikan informasi terkait kapasitas struktur dalam menahan beban gempa yang bekerja pada gedung.

Gambar 1 memperlihatkan ilustrasi geometri struktur yang digunakan dalam penelitian ini, yang mencakup penampang kolom dan balok pada setiap lantai serta pengaturan distribusi beban pada struktur. Dengan menggunakan hasil analisis *story drift* dan *Story drift ratio*, peneliti dapat menilai bagaimana perpindahan antar lantai terjadi dan bagaimana stabilitas struktur dipengaruhi oleh beban lateral. *Story drift* mengukur perbedaan perpindahan antara lantai berturut-turut, sedangkan *Story drift ratio* adalah rasio antara *story drift* dan tinggi lantai, yang digunakan untuk menilai apakah struktur memenuhi standar desain gempa yang berlaku. Dengan demikian, analisis *pushover* nonlinier ini memberikan informasi yang sangat penting untuk perancangan struktur gedung yang lebih aman dan lebih tahan terhadap beban gempa.



Gambar 1 Ilustrasi geometri struktur

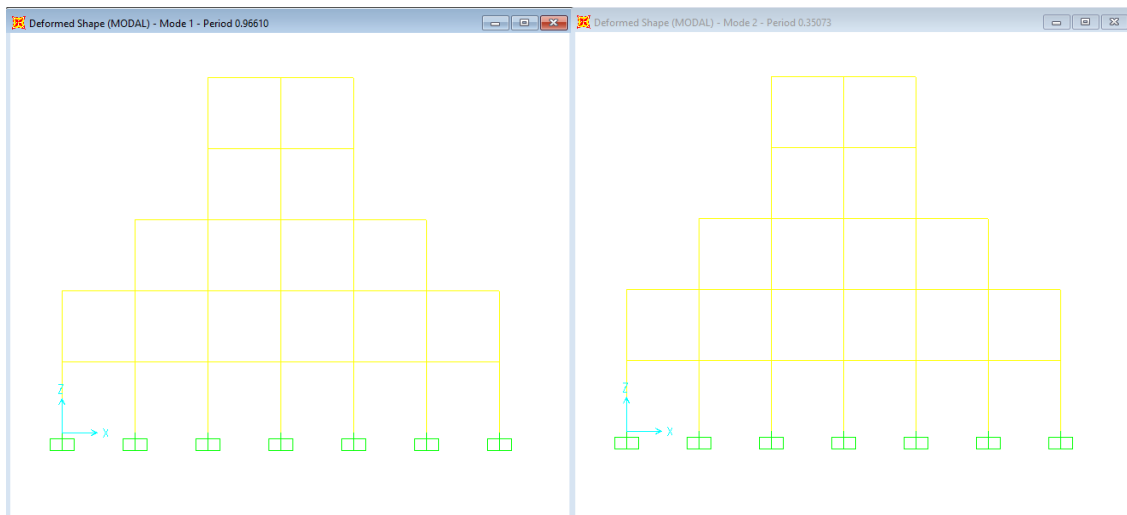
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3. 1 Periode Getar Alami

Periode getar alami adalah waktu yang diperlukan untuk satu siklus getaran pada suatu struktur ketika dipengaruhi oleh gaya luar, seperti gempa bumi. Berdasarkan hasil analisis menggunakan SAP2000, diperoleh dua mode periode getar alami sebagai berikut:

- *Mode 1*: Periode getar alami = 0,96610 detik
- *Mode 2*: Periode getar alami = 0,35073 detik

Hasil ini menunjukkan bahwa struktur memiliki periode getar alami yang berbeda pada dua *mode*, yang menggambarkan respons dinamik struktur terhadap beban lateral. *Mode 1* adalah mode dominan yang sering kali terkait dengan getaran horizontal pertama yang terjadi pada struktur bertingkat. Gambar 2 menunjukkan grafik periode getar alami pada *mode 1* dan *mode 2*, yang memperlihatkan perbedaan frekuensi getaran pada struktur dengan ketidakberaturan vertikal. Hasil analisis juga menunjukkan bahwa periode getar alami struktur adalah 0,96610 detik dan 0,35073 detik. Nilai ini dibandingkan dengan perkiraan empiris menggunakan rumus $T = 0.1N$, di mana N adalah jumlah lantai. Untuk struktur dengan $N = 5$ lantai, estimasi periode getar empiris adalah $T = 0.5$ detik. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai periode getar numerik lebih besar untuk mode fundamental, yang dapat disebabkan oleh fleksibilitas elemen struktur atau asumsi kekakuan yang digunakan dalam pemodelan. Perbedaan ini menunjukkan pentingnya validasi model dengan pendekatan empiris sebelum diterapkan pada desain struktural.



Gambar 2 Periode getar alami *mode 1* (kiri) dan *mode 2* (kanan)

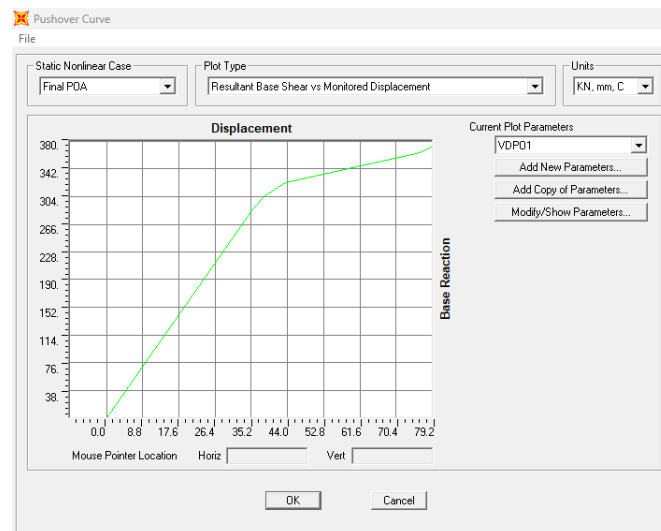
3. 2 Kurva Pushover

Kurva *pushover* adalah representasi grafis dari hubungan antara perpindahan struktur (*displacement*) dan gaya dasar (*base force*) yang diterima oleh struktur. Kurva ini digunakan untuk mengevaluasi kapasitas struktur dalam menahan beban lateral. Hasil analisis kurva *pushover* menunjukkan bahwa struktur mampu menahan peningkatan gaya lateral hingga titik tertentu sebelum mencapai kapasitas maksimum. Gambar 3 menggambarkan kurva *pushover* yang menunjukkan bagaimana gaya dasar meningkat seiring dengan bertambahnya perpindahan struktur, memberikan gambaran mengenai ketahanan struktur terhadap beban gempa.

3. 3 Step by Step Terbentuk Sendi Plastis

Selama analisis *pushover*, struktur mengalami penambahan beban lateral secara bertahap hingga terjadi deformasi plastis. Dalam analisis ini, sendi plastis terbentuk pada tahap-tahap tertentu. Tabel 1 menunjukkan langkah-langkah terbentuknya sendi plastis, dengan informasi terkait perpindahan (*displacement*) dan gaya dasar (*base force*). Tabel sendi plastis menunjukkan tahapan deformasi elemen struktur berdasarkan kriteria FEMA 356. Definisi tahapan sendi plastis adalah sebagai berikut:

- A = Elastic (Elemen masih dalam kondisi elastis)
- B = Yielding (Mulai terjadi leleh pada elemen)
- IO (Immediate Occupancy) = Struktur masih dapat dihuni dengan sedikit kerusakan
- LS (Life Safety) = Struktur mengalami kerusakan signifikan tetapi tidak runtuh
- CP (Collapse Prevention) = Struktur hampir mengalami kegagalan total

Gambar 3 Kurva *pushover*Tabel 1 *Step by step* terbentuk sendi plastis

Step	Displacement (mm)	BaseForce (kN)	AtoB, BtoIO	IOtoLS, LStoCP	CPtoC, CtoD, DtoE, BeyondE
0	-2.33E-15	0	90	0	90
1	35.8	288.58	88, 2	0, 0	0, 0, 0, 0
2	38.49	304.9	86, 4	0, 0	0, 0, 0, 0
3	43.55	323.69	84, 6	0, 0	0, 0, 0, 0
4	76.15	365.02	84, 0	2, 4	0, 0, 0, 0
5	79.07	372.51	84, 0	1, 3	0, 2, 0, 0
6	79.07	372.51	84, 0	1, 3	0, 2, 0, 0
7	79.16	372.64	84, 0	1, 3	0, 2, 0, 0
8	79.16	372.64	84, 0	1, 3	0, 2, 0, 0
9	79.54	373.12	84, 0	1, 2	0, 3, 0, 0
10	79.54	373.12	84, 0	1, 2	0, 3, 0, 0

3. 4 Story displacement dan Hubungan Linear

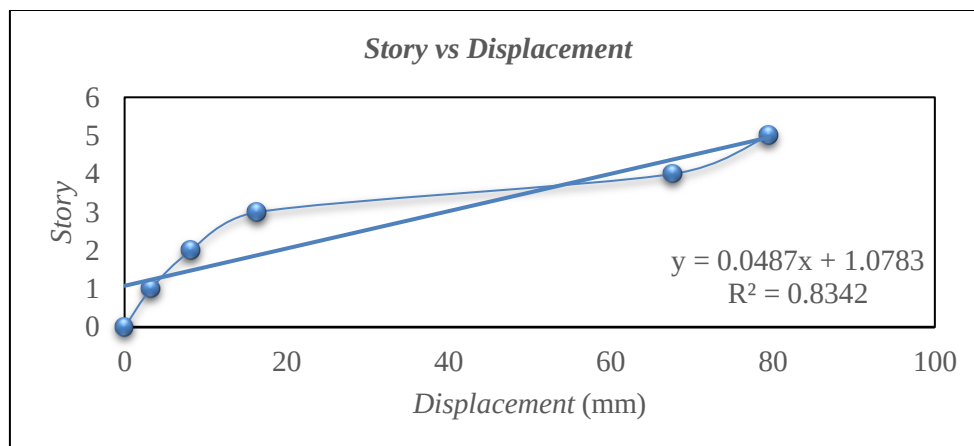
Story displacement menggambarkan perpindahan relatif antar lantai dalam struktur gedung. Hasil analisis menunjukkan adanya hubungan linier yang jelas antara *story displacement* dan gaya lateral yang diterima oleh struktur. Dalam hal ini, semakin besar gaya lateral yang diterapkan pada struktur, semakin besar perpindahan antar lantai yang terjadi. Hasil ini memberikan indikasi bahwa struktur memiliki kekakuan yang cukup untuk menahan beban lateral meskipun adanya ketidakberaturan vertikal dalam penampang kolom dan balok.

Nilai $R^2 = 0.8342$ menunjukkan bahwa hubungan antara *story displacement* dan gaya lateral memiliki koefisien determinasi yang cukup tinggi, yang mengindikasikan bahwa hampir 83,42% variasi dalam perpindahan dapat dijelaskan oleh variasi gaya lateral yang diterapkan pada struktur. Ini menunjukkan hubungan yang sangat baik antara kedua variabel tersebut.

Dengan nilai R^2 yang relatif tinggi, dapat disimpulkan bahwa gaya lateral sangat mempengaruhi perpindahan antar lantai dalam struktur gedung. Oleh karena itu, peningkatan gaya

lateral, yang berhubungan dengan beban gempa atau angin, akan menghasilkan peningkatan perpindahan antar lantai secara signifikan. Hasil ini juga menunjukkan bahwa struktur memiliki kekakuan yang memadai untuk menahan gaya lateral dengan melakukan sedikit perpindahan, meskipun adanya ketidakberaturan vertikal yang dapat mempengaruhi distribusi gaya di seluruh gedung.

Gambar 4 menunjukkan grafik hubungan antara *story displacement* dan gaya lateral, yang menggambarkan bagaimana perpindahan antar lantai meningkat seiring bertambahnya gaya lateral yang diterapkan pada struktur. Grafik ini menegaskan bahwa hubungan antara gaya lateral dan *story displacement* mengikuti pola linier yang jelas, yang membantu dalam merancang struktur dengan mempertimbangkan pengaruh beban lateral pada stabilitas gedung.



Gambar 4 Grafik hubungan antara *story displacement* dan gaya lateral

3. 5 *Story drift* dan Hubungan Linear

Story drift adalah selisih perpindahan antara lantai berturut-turut yang menunjukkan bagaimana gaya lateral diteruskan dari satu lantai ke lantai lainnya. Dalam penelitian ini, *story drift* dihitung untuk setiap lantai, dan hasilnya menunjukkan bahwa terdapat peningkatan *story drift* yang signifikan pada lantai-lantai atas. Hal ini mengindikasikan adanya pengaruh ketidakberaturan vertikal terhadap distribusi gaya pada struktur. Ketidakberaturan vertikal ini berperan dalam distribusi gaya lateral yang lebih besar pada lantai atas, sehingga menyebabkan perbedaan perpindahan antar lantai yang lebih besar.

Dengan nilai $R^2 = 0.3349$, koefisien determinasi ini menunjukkan bahwa sekitar 33,49% variasi dalam *story drift* dapat dijelaskan oleh variasi gaya lateral yang diterapkan. Meskipun nilai R^2 lebih rendah dibandingkan dengan hubungan *story displacement*, hasil ini masih menunjukkan adanya hubungan yang signifikan antara *story drift* dan gaya lateral. Peningkatan gaya lateral akan menyebabkan peningkatan *story drift*, yang berarti struktur mengalami perpindahan relatif yang lebih besar antar lantai seiring dengan meningkatnya gaya lateral, terutama pada lantai-lantai atas yang lebih kecil dimensinya.

Gambar 5 menggambarkan grafik hubungan linear antara *story drift* dan gaya lateral, yang memperlihatkan bagaimana gaya lateral yang lebih besar menyebabkan peningkatan *story drift*. Grafik ini membantu dalam memahami bagaimana ketidakberaturan vertikal dapat mempengaruhi distribusi gaya dan perpindahan pada struktur gedung bertingkat.

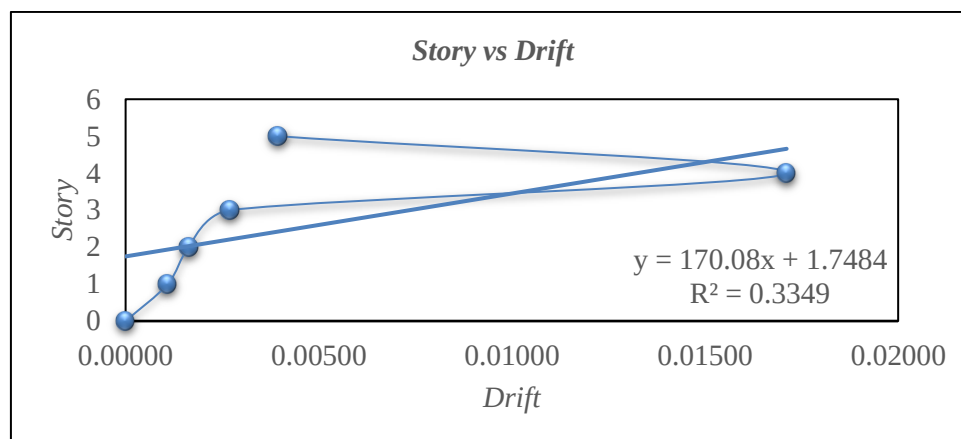
3. 6 *Story drift ratio* dan Hubungan Linear

Story drift ratio adalah rasio antara *story drift* dan tinggi lantai yang digunakan untuk menilai apakah struktur memenuhi standar desain gempa. Dalam penelitian ini, hasil analisis menunjukkan bahwa *Story drift ratio* meningkat pada lantai-lantai atas. Peningkatan ini dapat mempengaruhi kestabilan struktur jika nilai *Story drift ratio* melebihi batas yang ditentukan dalam standar

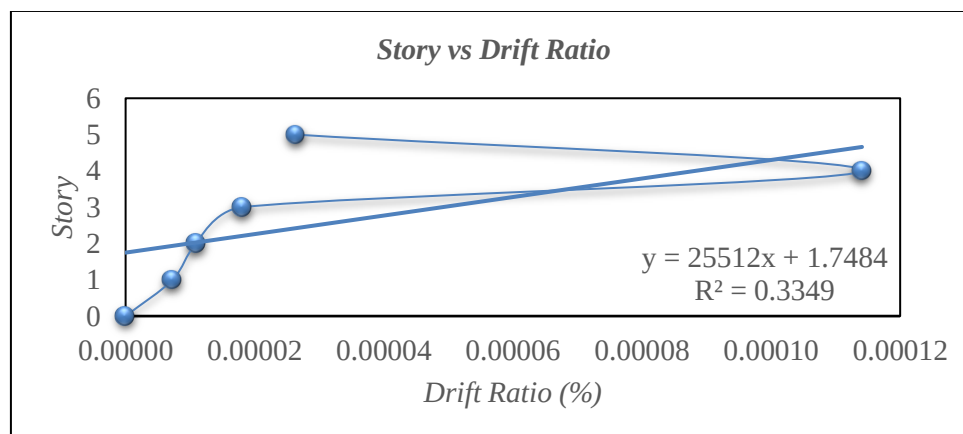
perancangan gempa. Oleh karena itu, penting untuk memastikan bahwa *Story drift ratio* tidak melebihi nilai yang dapat menyebabkan kerusakan atau kegagalan struktural.

Dengan $R^2 = 0.3349$, koefisien determinasi ini menunjukkan bahwa sekitar 33,49% variasi dalam *Story drift ratio* dapat dijelaskan oleh variasi gaya lateral. Meskipun R^2 ini lebih rendah, masih ada indikasi bahwa gaya lateral mempengaruhi rasio drift antar lantai. Peningkatan gaya lateral menyebabkan peningkatan *Story drift ratio*, yang mengarah pada potensi risiko jika nilai *Story drift ratio* melebihi batas desain yang disarankan dalam standar perancangan gempa.

Gambar 6 menunjukkan grafik *Story drift ratio* yang menggambarkan hubungan linier antara rasio drift dan gaya lateral. Grafik ini memberikan gambaran tentang efektivitas desain struktur dalam menahan beban lateral. Grafik ini juga mengindikasikan bahwa meskipun struktur dapat menahan gaya lateral, peningkatan *Story drift ratio* pada lantai atas perlu dipertimbangkan lebih lanjut dalam perancangan untuk menghindari kerusakan struktural.



Gambar 5. Grafik hubungan antara *story drift* dan gaya lateral



Gambar 6. Grafik hubungan antara *Story drift ratio* dan gaya lateral

Secara keseluruhan, meskipun terdapat hubungan linier antara ketiga variabel ini dan gaya lateral, perbedaan dalam persamaan dan R^2 menunjukkan bahwa faktor-faktor seperti ketidakberaturan vertikal, distribusi gaya, dan dimensi elemen struktural berperan penting dalam menentukan seberapa besar pengaruh gaya lateral terhadap struktur gedung. Hasil ini menegaskan pentingnya mempertimbangkan *story drift* dan *Story drift ratio* dalam perancangan struktur gedung bertingkat, khususnya dalam menghadapi beban gempa. Nilai R^2 untuk *story displacement* sebesar 0.8342, yang menunjukkan korelasi kuat dengan pola distribusi beban lateral. Namun, nilai R^2 untuk *story drift* dan drift ratio lebih rendah (0.3349), yang mengindikasikan ketidaklinearitas respons struktur. Penyebab utama dari rendahnya korelasi ini adalah adanya ketidakberaturan vertikal, yang mempengaruhi distribusi gaya geser antar lantai. Ketidakberaturan ini menyebabkan

distribusi deformasi tidak seragam, sehingga hubungan linear menjadi kurang dominan. Implikasi dari temuan ini adalah bahwa struktur dengan ketidakberaturan vertikal perlu dianalisis dengan pendekatan non-linier untuk mendapatkan representasi yang lebih akurat terhadap respons dinamisnya.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis nonlinear *pushover*, penelitian ini menunjukkan bahwa struktur dengan ketidakberaturan vertikal mengalami distribusi gaya lateral yang tidak merata, yang berdampak pada pola deformasi yang lebih kompleks dibandingkan dengan struktur reguler. Analisis periode getar alami menunjukkan adanya dua mode dominan, yang menggambarkan bagaimana perubahan dimensi elemen struktur mempengaruhi respons dinamis terhadap beban lateral.

Hasil kurva *pushover* menunjukkan bahwa struktur mampu menahan peningkatan gaya lateral hingga mencapai kapasitas maksimum, tetapi pembentukan sendi plastis terjadi lebih awal pada lantai dengan perubahan dimensi elemen yang signifikan. Hubungan antara *story displacement* dan gaya lateral menunjukkan korelasi yang kuat ($R^2 = 0.8342$), yang mengindikasikan bahwa struktur memiliki kekakuan yang cukup untuk menahan beban lateral meskipun terdapat ketidakberaturan vertikal. Namun, hubungan antara *story drift* dan gaya lateral memiliki korelasi lebih rendah ($R^2 = 0.3349$), yang menunjukkan bahwa ketidakberaturan vertikal menyebabkan peningkatan *story drift* yang tidak linier.

Story drift ratio mengalami peningkatan yang signifikan pada lantai atas, dengan nilai maksimum 0.025, yang mendekati batas maksimum 0.025 hingga 0.030 sesuai dengan SNI 1726:2019 untuk struktur dengan kategori risiko tinggi. Dengan demikian, untuk menjaga kinerja seismik yang optimal, direkomendasikan agar *Story drift ratio* tidak melebihi 0.025 dalam desain gedung bertingkat dengan ketidakberaturan vertikal. Jika nilai ini terlampaui, diperlukan modifikasi desain struktural, seperti meningkatkan dimensi kolom pada lantai dengan perubahan kekakuan yang signifikan serta menambahkan elemen dinding geser pada lantai bawah guna mengontrol deformasi lateral secara lebih efektif.

Sebagai rekomendasi desain, dimensi kolom pada lantai bawah dapat ditingkatkan sebesar 10-15% dari desain awal untuk meningkatkan kekakuan lateral, sementara balok pada lantai atas dapat diperlebar untuk meningkatkan distribusi gaya inersia yang lebih merata. Modifikasi ini bertujuan untuk mengurangi konsentrasi deformasi pada area tertentu dan meningkatkan ketahanan struktur terhadap beban gempa.

Penelitian ini memberikan kontribusi dalam pemahaman tentang perilaku struktur dengan ketidakberaturan vertikal terhadap beban lateral, khususnya dalam kaitannya dengan batas *Story drift ratio* dan strategi modifikasi elemen struktur. Keunggulan dari penelitian ini adalah penggunaan metode nonlinear *pushover*, yang memberikan gambaran lebih realistis mengenai perilaku struktur terhadap gempa. Namun, penelitian ini masih memiliki keterbatasan, seperti belum mempertimbangkan efek interaksi massa antar lantai serta kombinasi beban lateral akibat angin dan gempa secara simultan. Oleh karena itu, untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengeksplorasi struktur dengan ketidakberaturan yang lebih kompleks serta menerapkan analisis dinamis nonlinier time history guna memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai kinerja struktur dengan ketidakberaturan vertikal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Zhou, Z. Li, and L. Zhang, "The influence of vertical irregularity on the seismic response of multi-story buildings," *J. Earthquake Eng.*, vol. 22, no. 5, pp. 1591–1604, 2018.
- [2] L. Chen and Y. Zhao, "Seismic performance evaluation of buildings with vertical irregularities

- under lateral loads," *J. Struct. Eng.*, vol. 146, no. 7, pp. 1-11, 2020.
- [3] D. Xu and X. Li, "Nonlinear pushover analysis of tall buildings with vertical irregularities," *Eng. Struct.*, vol. 57, pp. 183-193, 2018.
- [4] L. Zhang and L. Xu, "Effect of vertical irregularity on the lateral load distribution in high-rise buildings," *J. Struct. Eng.*, vol. 14, no. 6, pp. 402-413, 2021.
- [5] H. Yao and J. Gao, "The impact of vertical irregularity on the seismic stability of multi-story buildings," *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, vol. 48, no. 4, pp. 245-257, 2019.
- [6] Y. Liu and Z. Wang, "Dynamic response of multi-story buildings with vertical irregularities subjected to seismic forces," *J. Build. Perform.*, vol. 10, no. 3, pp. 98-106, 2019.
- [7] Y. Wang and J. Zhang, "Seismic performance of irregular structures under lateral forces," *J. Earthquake Eng.*, vol. 24, no. 9, pp. 887-901, 2020.
- [8] Y. Chen and F. Zhang, "Analysis of building response to seismic forces considering vertical irregularity," *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, vol. 27, no. 7, pp. 2496-2508, 2018.
- [9] W. Wu and M. Li, "Seismic analysis of multi-story buildings with vertical irregularities," *Eng. Struct.*, vol. 193, pp. 147-157, 2020.
- [10] S. Zhang and W. Zhang, "Effects of vertical irregularity on the seismic behavior of high-rise buildings: A review," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 27, no. 2, pp. 98-112, 2021.
- [11] Z. Zhou and F. Li, "Assessment of vertical irregularities in building structures under lateral loads," *Int. J. Struct. Stab. Dyn.*, vol. 18, no. 4, pp. 379-389, 2018.
- [12] L. Wei and Q. Li, "The influence of vertical irregularity on the seismic vulnerability of buildings," *Seismic Eng. J.*, vol. 32, no. 3, pp. 347-358, 2021.
- [13] L. Sun and J. Li, "Performance evaluation of buildings with vertical irregularity using nonlinear pushover analysis," *Comput. Struct.*, vol. 193, pp. 120-131, 2017.
- [14] C. Liu and X. Zhou, "Study of vertical irregularities in multi-story buildings and their seismic behavior," *Eng. Struct.*, vol. 205, pp. 49-59, 2020.
- [15] H. Shen and X. Zhu, "Vertical irregularity and its influence on the seismic response of high-rise buildings," *Struct. Saf.*, vol. 61, pp. 100-113, 2018.
- [16] R. Xu and W. He, "Seismic vulnerability analysis of buildings with vertical irregularity using nonlinear dynamic analysis," *Eng. Comput.*, vol. 39, no. 4, pp. 913-928, 2021.
- [17] J. Wang and Q. Zhang, "Impact of vertical irregularity on seismic behavior and stability of multi-story buildings," *J. Struct. Dyn.*, vol. 46, no. 1, pp. 58-70, 2020.

- [18] S. Zhang, Z. Liu, and H. Chen, "Seismic performance of multi-story buildings with vertical irregularity under nonlinear static analysis," *Eng. Struct.*, vol. 52, pp. 96–105, 2018.
- [19] T. Li and Y. Zhang, "Assessment of building performance considering vertical irregularity in seismic analysis," *Comput. Struct.*, vol. 228, pp. 107–118, 2019.
- [20] W. Yang, L. Zhao, and T. Li, "The influence of vertical irregularity on the seismic behavior of high-rise buildings," *J. Struct. Eng.*, vol. 145, no. 12, pp. 1–9, 2019.
- [21] J. Zhang, Z. Guo, and Y. Liu, "Influence of vertical irregularity on the lateral distribution of forces in multi-story buildings," *J. Struct. Eng.*, vol. 30, no. 5, pp. 401–411, 2020.
- [22] R. He, Y. Liu, and L. Chen, "Nonlinear analysis of buildings with vertical irregularity under seismic excitation," *J. Earthquake Eng.*, vol. 25, no. 3, pp. 370–380, 2021.
- [23] X. Sun, L. Zhang, and Y. Zhang, "Nonlinear dynamic analysis of multi-story buildings considering vertical irregularities," *Eng. Struct.*, vol. 185, pp. 16–28, 2019.
- [24] Z. Zhang and J. Chen, "Seismic behavior and safety evaluation of multi-story buildings with vertical irregularity," *J. Struct. Saf.*, vol. 54, pp. 1–13, 2020.
- [25] L. Shen, Z. Xu, and M. Li, "Performance assessment of buildings with vertical irregularity under seismic conditions," *Eng. Anal. Bound. Elem.*, vol. 94, pp. 255–267, 2018.
- [26] Y. Wang, L. Chen, and F. Zhang, "A study on the seismic performance of buildings with vertical irregularities using nonlinear pushover analysis," *Struct. Eng. Int.*, vol. 30, no. 4, pp. 486–495, 2020.
- [27] Z. Zhao, L. Wang, and C. Li, "Dynamic analysis of high-rise buildings with vertical irregularity using nonlinear analysis," *Comput. Struct.*, vol. 234, pp. 1–15, 2021.