



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

Sharent Kumar¹⁾, Samsul Abdul Rahman Sidik Hasibuan²⁾*

^{1,2}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Medan Area

*Corresponding author. samsulrahman@staff.uma.ac.id

ARTICLE INFO

Keywords:

Vertical Irregularity,
Nonlinear Pushover,
SAP2000, Story
Displacement, Story Drift,
Earthquake

How to cite:

Sharent Kumar, Samsul
Abdul Rahman Sidik
Hasibuan (2025). Kajian
Analisis Struktur Gedung
2D dengan
Ketidakberaturan Vertikal
Menggunakan Metode
Nonlinear Pushover



ABSTRACT

Multi-story buildings with vertical irregularities often experience uneven load distribution, which can affect the structural performance under lateral loads, particularly seismic forces. Vertical 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 crucial 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 significant linear relationship between story displacement and lateral forces ($R^2 = 0.8898$), as well as the impact of vertical irregularities that increase story drift and story drift ratio on the upper floors. The increase in story drift ratio exceeding the earthquake design standard limits may affect the stability of the structure. Furthermore, this study reveals 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, accounting for a more uniform distribution of forces throughout the building to ensure structural resilience against seismic loads.

1. Pendahuluan

Dalam perancangan struktur gedung, terutama pada gedung bertingkat tinggi, sangat penting untuk memperhatikan ketidakberaturan vertikal yang sering terjadi. Ketidakberaturan vertikal merujuk pada variasi dimensi elemen struktur, seperti kolom dan balok, yang dapat memengaruhi distribusi beban serta kinerja keseluruhan struktur. Fenomena ini umumnya ditemukan pada gedung bertingkat yang memiliki fungsi ruang yang bervariasi pada setiap lantai, yang mengakibatkan perubahan dimensi elemen struktur seiring bertambahnya tinggi bangunan (Laresi, 2017; Abdila, 2024). Meskipun perancangan struktur pada umumnya telah mempertimbangkan beban vertikal dan lateral, ketidakberaturan vertikal seringkali kurang diperhatikan dalam proses perencanaan. Padahal, ketidakberaturan vertikal ini dapat

memengaruhi secara signifikan stabilitas dan keamanan gedung, terutama ketika struktur mengalami beban gempa (Yahya & Pradipta, 2022; Kartiko et al., 2021).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak ketidakberaturan vertikal terhadap perilaku struktur gedung bertingkat tinggi. Gedung yang memiliki ketidakberaturan vertikal cenderung lebih rentan terhadap redistribusi gaya serta perubahan pola perpindahan, yang dapat menyebabkan peningkatan deformasi bahkan kegagalan struktural pada bagian tertentu dari bangunan (Primadana & Anwar, 2021; Elvarando, 2020). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang tepat dalam menganalisis serta merancang gedung dengan ketidakberaturan vertikal agar struktur dapat bertahan terhadap beban lateral, khususnya beban gempa (Kunda, 2022).

Salah satu tantangan utama dalam perancangan gedung bertingkat adalah bagaimana menganalisis pengaruh ketidakberaturan vertikal terhadap perilaku struktural gedung tersebut. Ketidakberaturan vertikal ini dapat berupa variasi dimensi kolom dan balok pada setiap lantai atau perubahan fungsi ruang yang mengharuskan perubahan dimensi elemen struktural (De Stefano & Mariani, 2014; D'Ambrisi, De Stefano, & Tanganelli, 2009). Isu ini semakin penting seiring dengan meningkatnya penggunaan teknik analisis non-linear untuk menilai respons struktur terhadap beban dinamis, seperti gempa. Metode seperti analisis pushover nonlinear memungkinkan analisis yang lebih realistis mengenai perilaku struktur di bawah beban lateral, yang tidak dapat dicapai melalui pendekatan linier tradisional (Cimellaro, Giovine, & Lopez-Garcia, 2014; Yurizka & Rosyidah, 2020).

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 (Mondal, Rao, & Srinivas, 2021; Mahfuzur Rahman, 2008). Oleh karena itu, ketidakberaturan vertikal harus dipertimbangkan secara mendalam dalam desain dan analisis struktur untuk memastikan ketahanan bangunan terhadap bencana alam, seperti gempa bumi (Aşikoğlu, Vasconcelos, & Lourenço, 2021).

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji pengaruh ketidakberaturan vertikal terhadap kinerja struktur gedung. Penelitian oleh Zhou et al. (2018) mengungkapkan 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 (Benaied et al., 2023; RM et al., 2023). Penelitian tersebut menggunakan metode pushover nonlinear untuk menganalisis kinerja struktur gedung dengan ketidakberaturan vertikal, yang memberikan hasil yang lebih akurat dalam memprediksi perilaku struktur dibandingkan dengan metode linier tradisional (Azizi-Bondarabadi, Mendes, & Lourenço, 2021).

Penelitian lain oleh Chen et al. (2020) juga mengkaji dampak ketidakberaturan vertikal pada distribusi gaya lateral pada gedung bertingkat (Kalibhat et al., 2014). Mereka menemukan bahwa ketidakberaturan vertikal dapat menyebabkan perbedaan besar dalam gaya aksial dan momen pada kolom, yang meningkatkan risiko keruntuhan pada struktur. Penelitian ini menekankan pentingnya penggunaan analisis non-linear untuk mengevaluasi kinerja gedung dengan ketidakberaturan vertikal, terutama dalam konteks gempa (Das, Dutta, & Datta, 2021; Ro, Kim, & Lee, 2022).

Namun demikian, meskipun sejumlah penelitian telah membahas ketidakberaturan vertikal pada gedung bertingkat tinggi, masih terdapat kekurangan dalam penerapan metode yang lebih tepat untuk analisis gedung dengan ketidakberaturan vertikal menggunakan perangkat lunak analisis struktural modern (Babu, Balaji, & Gopalaraju, 2012; Balkaya & Kalkan, 2003). Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kekurangan tersebut dengan menggunakan SAP2000 dan metode pushover nonlinear, yang dapat memberikan gambaran yang lebih jelas dan akurat mengenai perilaku struktur gedung bertingkat dengan ketidakberaturan vertikal di bawah beban gempa (Hasibuan, Ma'arif, & Praja, 2023).

Melalui penelitian ini, diharapkan dapat ditemukan solusi untuk meningkatkan keamanan dan ketahanan struktur gedung bertingkat tinggi dengan ketidakberaturan vertikal, serta memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan metode perancangan yang lebih efektif untuk menghadapi tantangan ini (Mwafy & Khalifa, 2017; Ro, Kim, & Lee, 2022).

2. Metode Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku struktur gedung bertingkat 2D yang memiliki ketidakberaturan vertikal, dengan menggunakan metode nonlinear pushover. Pemodelan struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak SAP2000, yang memungkinkan analisis mendalam terhadap distribusi gaya dan deformasi struktur di bawah pengaruh beban gempa. Struktur yang dianalisis merupakan gedung bertingkat dengan total tinggi 15 meter, yang terdiri dari lima lantai, masing-masing dengan tinggi 3 meter. Gedung ini memiliki kolom dan balok dengan dimensi yang bervariasi pada setiap lantainya, yang menciptakan ketidakberaturan vertikal. Perubahan dimensi elemen struktur ini berpotensi mempengaruhi kinerja struktur secara keseluruhan dalam menanggapi beban lateral.

Beban yang diterapkan pada struktur mencakup beban mati, beban hidup, dan beban lateral. Beban mati sebesar $3,75 \text{ kN/m}^2$ diterapkan pada seluruh lantai, mencakup berat elemen struktur serta elemen permanen lainnya. Beban hidup sebesar 4 kN/m^2 mengacu pada beban yang dapat berubah-ubah sesuai dengan penggunaan ruang. Beban lateral sebesar 1000 kN diterapkan pada titik sambungan antara kolom dan balok di seluruh lantai, dengan tujuan untuk mensimulasikan beban gempa yang bekerja pada struktur.

Analisis nonlinear pushover adalah 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 struktur merespon beban gempa yang diterapkan. Pada analisis ini, peningkatan beban lateral dilakukan secara bertahap, menghasilkan kurva pushover yang menggambarkan hubungan antara displacement (perpindahan) struktur dan base force (gaya dasar) yang diterima oleh struktur. Kurva pushover ini memberikan wawasan terkait kapasitas deformasi dan kekuatan struktur dalam menghadapi beban lateral, yang pada akhirnya digunakan untuk menilai kinerja gedung di bawah kondisi gempa.

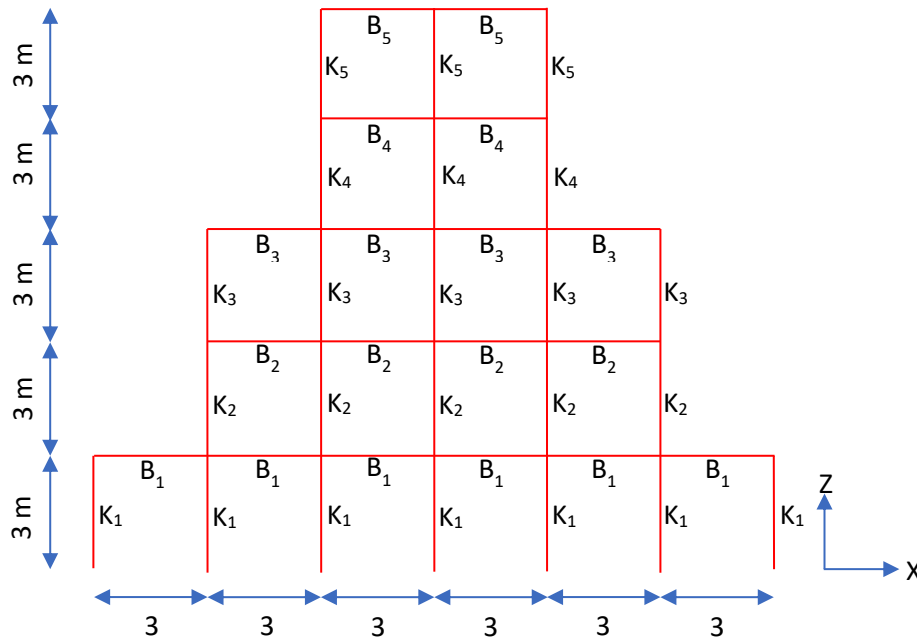
Langkah pertama dalam analisis pushover adalah penambahan beban lateral secara bertahap hingga struktur mencapai titik kegagalan, yang berarti struktur telah mengalami deformasi permanen. Pada tahap ini, titik-titik tertentu pada struktur akan menunjukkan perubahan perilaku, dan sendi plastis mulai terbentuk.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

Hasil dari analisis pushover nonlinear 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 memengaruhi kemampuan struktur dalam menahan beban gempa. Oleh karena itu, analisis ini memberikan informasi yang sangat penting terkait kapasitas struktur dalam menahan beban gempa yang bekerja pada gedung tersebut.

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, sementara 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 nonlinear ini memberikan informasi yang sangat penting untuk perancangan struktur gedung yang lebih aman dan lebih tahan terhadap beban gempa.

Tabel 1 menampilkan detail kolom dan balok yang digunakan dalam struktur ini, yang memaparkan dimensi elemen struktur serta pengaturan distribusi beban pada setiap lantai. Semua informasi ini memberikan gambaran yang lebih jelas tentang bagaimana ketidakberaturan vertikal berpotensi mempengaruhi distribusi gaya dalam struktur dan bagaimana hal ini dapat berdampak pada kinerja keseluruhan gedung saat diterpa beban gempa.



Gambar 1. Ilustrasi geometri struktur

Tabel 1. Detail kolom dan balok

Struktur	K1	K2	K3	K4	K5
Penampang Kolom (mm)	400 x 400	350 x 350	300 x 300	250 x 250	250 x 250
Clear Cover Confinement (mm)	75	75	75	75	75
Jumlah Batang Longitudinal	3 (3-Dimensi), 3 (2-Dimensi)	3 (3-Dimensi), 3 (2-Dimensi)	3 (3-Dimensi), 3 (2-Dimensi)	3 (3-Dimensi), 3 (2-Dimensi)	3 (3-Dimensi), 3 (2-Dimensi)
Ukuran Batang Longitudinal (mm)	25D	25D	25D	25D	25D
Ukuran Batang Confinement (mm)	10D	10D	10D	10D	10D
Struktur	B1	B2	B3	B4	B5
Penampang Balok (mm)	500 x 300	500 x 250	500 x 200	400 x 200	400 x 150
Clear Cover Balok (mm)	40	40	40	40	40

3. Hasil dan Pembahasan

A. Periode Getar Alami

Periode getar alami adalah waktu yang dibutuhkan oleh suatu struktur untuk menyelesaikan satu siklus getaran akibat pengaruh gaya eksternal, seperti beban gempa. Dalam konteks struktur gedung bertingkat, periode getar alami ini sangat penting untuk memahami bagaimana struktur merespons beban lateral yang diterapkan, khususnya beban dinamis seperti gempa bumi. Berdasarkan hasil analisis menggunakan perangkat lunak SAP2000, diperoleh dua mode periode getar alami yang signifikan, yaitu Mode 1: periode getar alami = 1,01076 detik dan Mode 2: periode getar alami = 0,36242 detik.

Hasil analisis ini menunjukkan adanya dua mode getar alami yang berbeda, yang mencerminkan respons dinamis struktur terhadap beban lateral dengan cara yang berbeda. Mode pertama (Mode 1) merupakan mode dominan pada struktur gedung bertingkat, yang terkait erat dengan getaran horizontal pertama yang terjadi pada struktur. Mode pertama ini mencerminkan pergerakan utama yang biasanya terjadi pada frekuensi rendah, yang berpengaruh signifikan terhadap respon struktur terhadap gempa. Sementara itu, Mode kedua, dengan periode yang lebih pendek, menggambarkan getaran yang terjadi pada frekuensi lebih tinggi dan berhubungan dengan respons lateral yang lebih kecil namun tetap penting dalam memahami kinerja struktur secara keseluruhan.

Gambar 2 memperlihatkan periode getar alami pada Mode 1 dan Mode 2, yang memperlihatkan perbedaan frekuensi getaran pada struktur dengan ketidakberaturan vertikal. Perbedaan periode getar alami ini menunjukkan bagaimana distribusi massa dan kekakuan yang tidak merata, akibat ketidakberaturan vertikal, dapat memengaruhi dinamika getaran struktur. Mode pertama lebih dominan pada struktur dengan ketidakberaturan vertikal, dan sering kali lebih sensitif terhadap distribusi gaya gempa, sementara mode kedua memberikan gambaran lebih mendetail mengenai perilaku struktur pada frekuensi yang lebih tinggi.



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

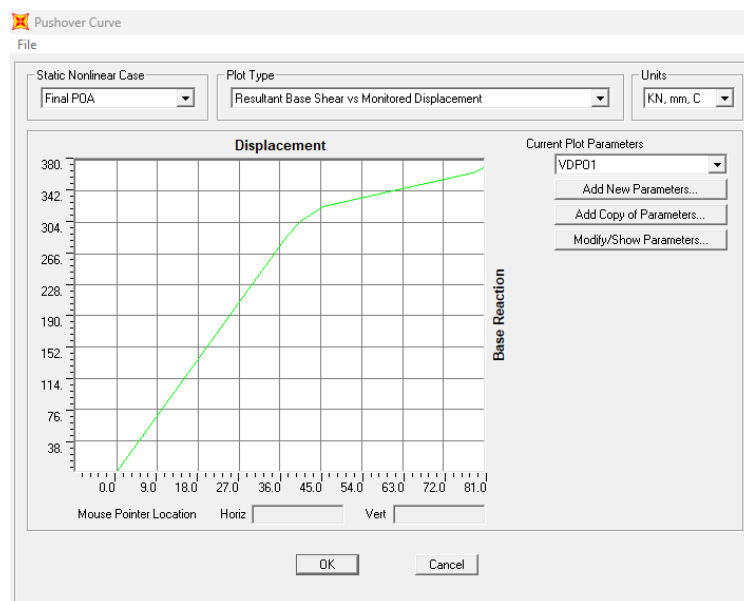
B. Kurva Pushover

Kurva pushover merupakan representasi grafis yang menggambarkan hubungan antara perpindahan struktur (displacement) dan gaya dasar (base force) yang diterima oleh struktur di bawah beban lateral yang meningkat secara bertahap. Kurva ini adalah alat yang sangat penting dalam mengevaluasi kapasitas struktur untuk menahan gaya lateral, khususnya beban dinamis seperti gempa. Proses analisis menggunakan kurva pushover memungkinkan kita untuk memahami perilaku struktur pada saat beban lateral meningkat, dan mengidentifikasi titik-titik kritis yang menunjukkan batas kapasitas struktural.

Hasil analisis kurva pushover ini menunjukkan bahwa struktur dapat menahan peningkatan gaya lateral hingga mencapai suatu titik tertentu, yang disebut titik kapasitas maksimum. Setelah titik ini tercapai, struktur mulai mengalami deformasi permanen, yang mengindikasikan bahwa kapasitas struktur dalam menahan beban lateral telah terlampaui. Oleh karena itu, kurva pushover tidak hanya memberikan informasi mengenai kekuatan struktural, tetapi juga memberikan gambaran tentang kapasitas deformasi struktur di bawah beban lateral yang ekstrem.

Gambar 3 menggambarkan kurva pushover yang menunjukkan bagaimana gaya dasar meningkat secara progresif seiring bertambahnya perpindahan struktur. Kurva ini memberikan wawasan mengenai ketahanan struktur terhadap beban gempa, dengan menggambarkan tahap-tahap deformasi yang dialami oleh struktur sebelum mencapai titik kegagalan. Dalam konteks ini, kurva pushover memberikan informasi yang sangat berguna dalam penilaian kinerja struktural, serta dalam perancangan gedung bertingkat yang tahan terhadap beban lateral yang disebabkan oleh gempa, memastikan bahwa struktur tetap aman dan stabil di bawah kondisi ekstrem.

Pentingnya analisis ini terletak pada kemampuannya untuk menggambarkan bagaimana struktur bereaksi terhadap peningkatan gaya lateral secara rinci, memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai kinerja struktur pada tingkat deformasi yang lebih tinggi, dan membantu merancang gedung dengan ketahanan yang optimal terhadap beban gempa yang dinamis.



Gambar 3. Kurva *pushover*

C. Terbentuknya Sendi Plastis pada Analisis Pushover

Selama proses analisis pushover, struktur mengalami penambahan beban lateral secara bertahap, yang menyebabkan terjadinya deformasi plastis pada elemen-elemen struktural tertentu. Deformasi plastis ini menunjukkan bahwa elemen struktur telah melampaui kapasitas elastisnya dan mulai mengalami kerusakan permanen. Proses ini sangat penting dalam memahami bagaimana struktur merespons peningkatan beban lateral, terutama beban gempa yang dapat terjadi pada struktur gedung bertingkat. Melalui analisis pushover, kita dapat memperoleh gambaran tentang kapan dan di mana sendi plastis terbentuk, yang merupakan titik kritis dalam struktur yang menandakan terjadinya kerusakan permanen pada elemen-elemen tertentu.

Tabel 2 menunjukkan langkah-langkah terbentuknya sendi plastis yang terjadi selama analisis pushover. Setiap langkah dalam analisis ini menggambarkan perubahan perpindahan (displacement) dan gaya dasar (base force) yang diterima oleh struktur saat beban lateral meningkat secara bertahap. Pada awalnya, saat langkah pertama (Step 0), perpindahan struktur adalah sangat kecil, hampir tidak ada (dalam nilai $-2.62E-15$ mm), dan gaya dasar yang diterima juga sangat rendah, yaitu 0 kN. Namun, seiring dengan bertambahnya langkah-langkah berikutnya, gaya lateral diterapkan lebih besar, dan struktur mulai mengalami deformasi yang lebih besar, tercatat pada langkah-langkah berikutnya seperti Step 1 (37.493 mm displacement dengan gaya dasar 287.522 kN).

Pada setiap langkah, kolom yang menunjukkan tahapan terbentuknya sendi plastis—seperti AtoB, BtoIO, IOtoLS, LStoCP, dan seterusnya—mewakili transisi kondisi struktur dari elastis ke plastis. Tahapan-tahapan ini mencerminkan bagaimana deformasi permanen terbentuk pada struktur. Misalnya, pada langkah ke-4 (Step 4), dengan perpindahan sebesar 78.493 mm dan gaya dasar 364.698 kN, struktur mulai menunjukkan deformasi plastis yang lebih signifikan, yang tercatat dalam tahapan LStoCP (dari keadaan elastis menuju kondisi plastis lanjut), menandakan bahwa beberapa bagian struktur mulai kehilangan kapasitas elastisnya. Ini berlanjut pada langkah-langkah berikutnya, yang menggambarkan penambahan deformasi plastis yang semakin berkembang.

Kolom terakhir dalam tabel, yaitu Total, mencatat nilai total gaya dasar yang diterima oleh struktur pada setiap langkah. Meskipun perubahan pada gaya dasar terjadi pada masing-masing langkah, nilai total gaya dasar tetap stabil pada 82 kN di setiap tahap, menunjukkan bahwa gaya total yang diterima struktur tidak berubah, meskipun proses deformasi berlangsung. Hal ini memberikan gambaran bahwa meskipun beban lateral meningkat, kapasitas struktur untuk menahan gaya tetap dapat diukur dalam setiap tahapan, dan proses kerusakan berlangsung secara terkendali, mengikuti tahapan yang ditentukan.

Tabel 2. Step by step terbentuk sendi plastis

Step	Displacement (mm)	BaseForce (kN)	AtoB, BtoIO, IOtoLS, LStoCP, CPtoC, CtoD, DtoE, BeyondE	Total
0	-2,62E-15	0	82, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0	82
1	37,493312	287,522	80, 2, 0, 0, 0, 0, 0, 0	82
2	40,583344	305,614	78, 4, 0, 0, 0, 0, 0, 0	82
3	45,396568	323,146	76, 6, 0, 0, 0, 0, 0, 0	82
4	78,493177	364,698	76, 0, 2, 4, 0, 0, 0, 0	82
5	81,431389	372,142	76, 0, 1, 3, 0, 2, 0, 0	82
6	81,431389	372,142	76, 0, 1, 3, 0, 2, 0, 0	82
7	81,495194	372,23	76, 0, 1, 3, 0, 2, 0, 0	82
8	81,495195	372,23	76, 0, 1, 3, 0, 2, 0, 0	82
9	81,50652	372,245	76, 0, 1, 3, 0, 2, 0, 0	82

D. Story Displacement dan Pengaruh Ketidakberaturan Vertikal terhadap Distribusi Gaya Lateral

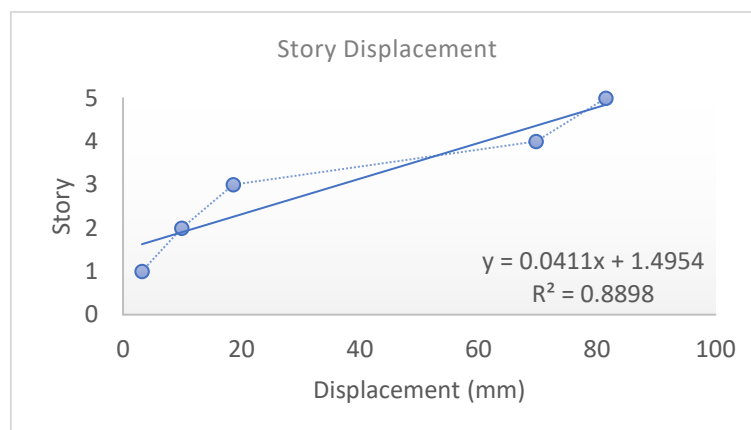
Story displacement menggambarkan perpindahan relatif antar lantai dalam struktur gedung yang terjadi akibat beban lateral yang diterapkan. Hasil analisis menunjukkan adanya hubungan linier yang sangat jelas antara story displacement dan gaya lateral yang diterima oleh struktur. Dalam hal ini, semakin 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. Ketidakberaturan vertikal, yang menciptakan variasi dimensi pada elemen struktur, berpotensi mempengaruhi distribusi gaya, namun struktur tetap menunjukkan ketahanan yang cukup terhadap beban lateral.

Persamaan regresi linier yang diperoleh adalah $y = 0.0411x + 1.4954$, dengan nilai $R^2 = 0.8898$. Koefisien determinasi yang sangat tinggi (0.8898) mengindikasikan bahwa hampir 89% variasi dalam story displacement dapat dijelaskan oleh variasi gaya lateral yang diterapkan pada struktur. Ini menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara kedua variabel tersebut, yang menegaskan bahwa gaya lateral sangat mempengaruhi perpindahan antar lantai dalam struktur gedung. Dengan kata lain, peningkatan gaya lateral, yang berhubungan dengan beban gempa atau angin, akan menghasilkan peningkatan perpindahan antar lantai secara signifikan.

Nilai $R^2 = 0.8898$ menunjukkan bahwa hampir 89% variasi dalam perpindahan antar lantai dapat dijelaskan oleh variasi gaya lateral yang diterapkan. Ini menandakan bahwa hubungan antara gaya lateral dan story displacement sangat konsisten dan linier, yang memberikan dasar yang kuat bagi perancangan struktur yang mempertimbangkan pengaruh beban lateral terhadap stabilitas gedung. Semakin besar gaya lateral yang diterapkan, semakin besar pula perpindahan antar lantai yang terjadi, yang mengindikasikan bahwa struktur memiliki kekakuan yang cukup untuk menahan gaya lateral tersebut.

Selain itu, hasil ini juga menunjukkan bahwa meskipun ketidakberaturan vertikal dapat mempengaruhi distribusi gaya pada seluruh gedung, struktur tetap menunjukkan kapasitas untuk mengatasi beban lateral dengan melakukan perpindahan yang terbatas. Hal ini menunjukkan bahwa struktur memiliki kekakuan yang memadai untuk mengatasi beban lateral meskipun adanya variasi dimensi pada elemen-elemen struktural.

Gambar 4 menunjukkan grafik hubungan antara story displacement dan gaya lateral. Grafik ini menggambarkan bagaimana perpindahan antar lantai meningkat seiring dengan bertambahnya gaya lateral yang diterapkan pada struktur. Kurva linier yang jelas terlihat pada grafik ini mengonfirmasi bahwa hubungan antara gaya lateral dan story displacement mengikuti pola yang dapat diprediksi, memberikan wawasan penting dalam merancang struktur yang stabil dan tahan terhadap beban lateral, seperti gempa dan angin. Hal ini juga membantu perancang dalam menentukan kapasitas kekakuan yang diperlukan untuk menjaga stabilitas gedung bertingkat.



Gambar 4. Grafik hubungan antara story displacement dan gaya lateral

E. Story Drift dan Pengaruh Ketidakberaturan Vertikal terhadap Distribusi Gaya Lateral

Story drift adalah selisih perpindahan antar lantai berturut-turut, yang menggambarkan bagaimana gaya lateral diteruskan dari satu lantai ke lantai lainnya. Fenomena ini penting untuk dipahami karena memberikan gambaran mengenai perbedaan perpindahan antar lantai yang terjadi akibat gaya lateral. Dalam penelitian ini, story drift dihitung untuk setiap lantai, dan hasil analisis menunjukkan adanya peningkatan story drift yang signifikan pada lantai-lantai atas. Peningkatan ini mengindikasikan adanya pengaruh ketidakberaturan vertikal terhadap distribusi gaya dalam struktur. Ketidakberaturan vertikal berperan dalam menyebabkan distribusi gaya

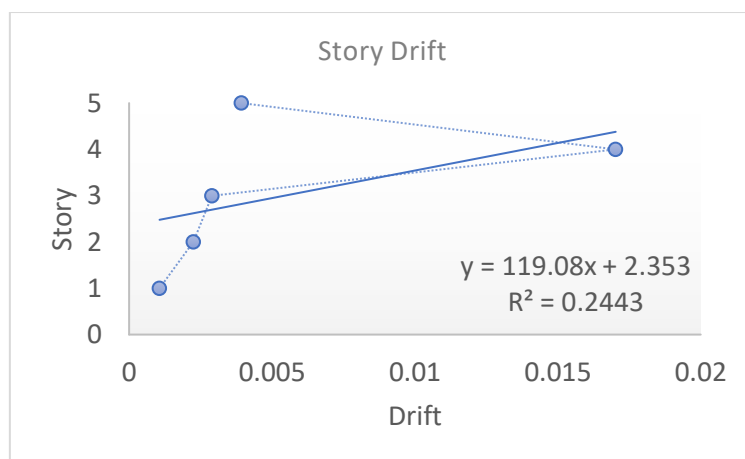
lateral yang lebih besar pada lantai-lantai atas, yang pada gilirannya mengakibatkan perbedaan perpindahan antar lantai yang semakin besar.

Koefisien determinasi ($R^2 = 0.2443$) yang diperoleh menunjukkan bahwa sekitar 24,43% variasi dalam story drift dapat dijelaskan oleh variasi gaya lateral yang diterapkan pada struktur. Meskipun nilai R^2 ini lebih rendah dibandingkan dengan hubungan antara story displacement dan gaya lateral (yang memiliki $R^2 = 0.8898$), nilai ini tetap menunjukkan bahwa terdapat hubungan signifikan antara story drift dan gaya lateral. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun ketidakberaturan vertikal menyebabkan variasi yang lebih besar dalam distribusi gaya lateral, gaya lateral tetap memiliki pengaruh signifikan terhadap perubahan story drift pada struktur. Dengan kata lain, peningkatan gaya lateral akan menyebabkan peningkatan story drift, yang mencerminkan perpindahan relatif yang lebih besar antar lantai, terutama pada lantai-lantai atas yang memiliki dimensi elemen struktural yang lebih kecil.

Persamaan linier yang diperoleh, yaitu $y = 119.08x + 2.353$, menunjukkan hubungan positif antara gaya lateral (x) dan story drift (y). Artinya, semakin besar gaya lateral yang diterapkan pada struktur, semakin besar pula nilai story drift yang terjadi, khususnya pada lantai-lantai atas. Perpindahan antar lantai ini berimplikasi pada kestabilan struktur gedung bertingkat dalam menghadapi beban lateral, yang pada akhirnya mempengaruhi perilaku dinamis gedung secara keseluruhan. Meningkatnya story drift mengindikasikan adanya penurunan kekakuan struktur terhadap beban lateral.

Gambar 5 menunjukkan grafik hubungan linier antara story drift dan gaya lateral, yang mengilustrasikan bahwa dengan bertambahnya gaya lateral, story drift juga meningkat. Grafik ini memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai bagaimana ketidakberaturan vertikal mempengaruhi distribusi gaya dan perpindahan antar lantai pada struktur gedung bertingkat. Oleh karena itu, pemahaman tentang hubungan ini sangat penting untuk memastikan bahwa struktur dapat menahan beban lateral dengan aman, terutama pada lantai-lantai atas yang lebih rentan terhadap perubahan gaya akibat ketidakberaturan vertikal.

Analisis ini juga menunjukkan bahwa pengaruh ketidakberaturan vertikal harus diperhitungkan secara seksama dalam perancangan dan evaluasi kinerja struktur gedung bertingkat, khususnya dalam konteks beban gempa atau beban lateral lainnya. Penting untuk mendesain elemen struktur dengan memperhatikan variasi ketidakberaturan vertikal agar dapat memastikan bahwa struktur tetap aman dan stabil di bawah beban lateral yang ekstrem.



Gambar 5. Grafik hubungan antara story drift dan gaya lateral

F. Story Drift Ratio dan Pengaruhnya terhadap Stabilitas Struktur Gedung

Story drift ratio adalah rasio antara story drift dan tinggi lantai, yang digunakan sebagai indikator untuk menilai apakah struktur memenuhi standar desain gempa yang berlaku. Nilai story drift

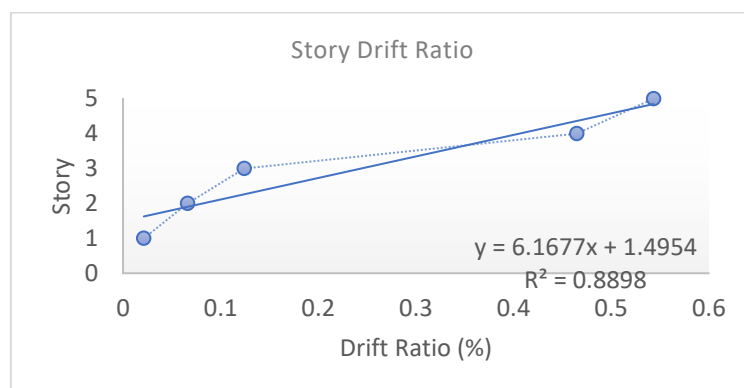
ratio memberikan gambaran tentang seberapa besar perbedaan perpindahan yang terjadi antar lantai dalam kaitannya dengan dimensi vertikal bangunan. Dalam penelitian ini, hasil analisis menunjukkan adanya peningkatan story drift ratio pada lantai-lantai atas. Peningkatan ini dapat mempengaruhi kestabilan struktur, terutama jika nilai story drift ratio melebihi batas yang ditetapkan dalam standar perancangan gempa. Oleh karena itu, penting untuk memastikan bahwa story drift ratio tidak melebihi nilai batas yang dapat menimbulkan potensi kerusakan atau kegagalan struktural, yang pada akhirnya dapat membahayakan keselamatan bangunan.

Hasil analisis menunjukkan bahwa dengan $R^2 = 0.8898$, sekitar 88,98% variasi dalam story drift ratio dapat dijelaskan oleh variasi gaya lateral yang diterapkan pada struktur. Koefisien determinasi yang sangat tinggi ini menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara gaya lateral dan story drift ratio, yang berarti bahwa gaya lateral memiliki pengaruh besar terhadap peningkatan perbedaan perpindahan antar lantai. Peningkatan gaya lateral, yang berhubungan dengan beban gempa atau angin, akan menyebabkan peningkatan story drift ratio, yang berpotensi melampaui batas yang disarankan dalam standar perancangan gempa.

Persamaan linier yang diperoleh, yaitu $y = 6.1677x + 1.4954$, menggambarkan hubungan positif yang jelas antara gaya lateral (x) dan story drift ratio (y). Artinya, semakin besar gaya lateral yang diterapkan pada struktur, semakin besar pula nilai story drift ratio yang terjadi, terutama pada lantai-lantai atas. Peningkatan story drift ratio ini mengindikasikan bahwa meskipun struktur mungkin memiliki kekakuan yang cukup untuk menahan gaya lateral secara keseluruhan, potensi risiko kegagalan struktural meningkat jika story drift ratio pada lantai atas melebihi batas desain yang aman.

Gambar 6 menunjukkan grafik yang menggambarkan hubungan linier antara story drift ratio dan gaya lateral. Grafik ini memberikan gambaran mengenai efektivitas desain struktur dalam menahan beban lateral, serta menunjukkan bagaimana peningkatan gaya lateral dapat mengarah pada peningkatan story drift ratio, yang pada gilirannya dapat memengaruhi kestabilan struktur. Meskipun struktur dapat menahan gaya lateral secara umum, grafik ini juga mengindikasikan bahwa peningkatan story drift ratio, terutama pada lantai atas, perlu dipertimbangkan dengan seksama dalam perancangan dan evaluasi struktur untuk mencegah potensi kerusakan atau kegagalan struktural.

Dengan demikian, analisis story drift ratio ini tidak hanya memberikan pemahaman tentang seberapa besar pergerakan antar lantai, tetapi juga memberikan indikasi penting mengenai seberapa besar beban lateral yang dapat diterima tanpa mengorbankan stabilitas gedung. Oleh karena itu, perhatian lebih perlu diberikan pada peningkatan story drift ratio di lantai atas agar struktur tetap aman dan memenuhi standar desain gempa yang telah ditentukan.



Gambar 6. Grafik hubungan antara story drift ratio dan gaya lateral

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, penelitian ini berhasil mengevaluasi pengaruh ketidakberaturan vertikal terhadap perilaku struktur gedung bertingkat menggunakan metode nonlinear pushover. Beberapa kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah sebagai berikut. Struktur gedung bertingkat dengan ketidakberaturan vertikal menunjukkan adanya dua mode periode getar alami yang berbeda, yang menggambarkan respons dinamik struktur terhadap beban lateral. Mode pertama (Mode 1) merupakan mode dominan yang terkait erat dengan getaran horizontal pertama pada struktur, sementara mode kedua berhubungan dengan getaran pada frekuensi lebih tinggi yang memberikan gambaran lebih mendetail tentang respons struktur pada frekuensi tersebut. Perbedaan periode getar alami ini memperlihatkan bagaimana distribusi massa dan kekakuan yang tidak merata akibat ketidakberaturan vertikal memengaruhi dinamika getaran struktur.

Hasil analisis kurva pushover menunjukkan bahwa struktur mampu menahan peningkatan gaya lateral hingga kapasitas maksimum, yang mengindikasikan ketahanan struktur terhadap beban gempa. Kurva ini memberikan wawasan tentang kapasitas struktur dalam menahan beban lateral dan deformasi permanen yang terjadi setelah kapasitas maksimum tercapai. Selain itu, analisis mengenai story displacement menunjukkan hubungan linier yang sangat jelas antara perpindahan antar lantai dan gaya lateral yang diterima oleh struktur, dengan nilai $R^2 = 0.8898$. Hal ini menunjukkan bahwa struktur memiliki kekakuan yang cukup untuk menahan beban lateral meskipun ada ketidakberaturan vertikal pada elemen struktural.

Analisis story drift mengungkapkan adanya peningkatan story drift yang signifikan pada lantai-lantai atas, yang disebabkan oleh pengaruh ketidakberaturan vertikal dalam distribusi gaya lateral. Peningkatan ini berimplikasi pada perubahan perpindahan antar lantai yang semakin besar, terutama pada lantai-lantai atas dengan dimensi elemen struktural yang lebih kecil. Lebih lanjut, story drift ratio juga meningkat pada lantai-lantai atas, yang dapat mempengaruhi kestabilan struktur jika nilai rasio ini melebihi batas yang ditetapkan dalam standar desain gempa. Oleh karena itu, sangat penting untuk mempertimbangkan pengaruh ketidakberaturan vertikal dalam perancangan untuk memastikan struktur tetap aman dan stabil di bawah beban lateral yang ekstrem.

Kelebihan utama dari penelitian ini adalah penggunaan metode nonlinear pushover, yang memberikan analisis lebih realistis mengenai perilaku struktur terhadap beban lateral, khususnya beban gempa. Metode ini memungkinkan untuk memahami respons struktur terhadap beban dinamis dengan lebih mendalam, membantu merancang struktur yang lebih tahan terhadap beban tersebut. Namun, terdapat kekurangan dalam penelitian ini, yaitu terbatasnya variasi jenis struktur dan beban yang diuji, yang dapat mempengaruhi generalisasi hasil penelitian ini. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk memperluas variasi jenis struktur yang dianalisis, serta mempertimbangkan kondisi beban lainnya, seperti angin, guna memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai kinerja struktur gedung bertingkat yang memiliki ketidakberaturan vertikal. Dengan demikian, penelitian lanjutan dapat memberikan wawasan yang lebih luas tentang ketahanan struktur terhadap beban dinamis dalam berbagai kondisi.

Referensi

Abdila, F. N. (2024). Studi komparasi analisis struktur dengan jenis tumpuan jepit dan spring soil structure interaction pada struktur beton bertulang tahan gempa (Doctoral dissertation, Universitas Islam Sultan Agung Semarang).

- Aşıkoğlu, A., Vasconcelos, G., & Lourenço, P. B. (2021). Overview on the nonlinear static procedures and performance-based approach on modern unreinforced masonry buildings with structural irregularity. *Buildings*, 11(4), 147.
- Azizi-Bondarabadi, H., Mendes, N., & Lourenço, P. B. (2021). Higher mode effects in pushover analysis of irregular masonry buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 25(8), 1459-1493.
- Azizi-Bondarabadi, H., Mendes, N., & Lourenço, P. B. (2021). Higher mode effects in pushover analysis of irregular masonry buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 25(8), 1459-1493.
- Babu, N. J., Balaji, K. Y. G. D., & Gopalaraju, S. S. S. V. (2012). Pushover analysis of unsymmetrical framed structures on sloping ground. *Int J Civ Struct Environ Infrastruct Eng Res Dev (IJCSEIERD)*, 2(4).
- Balkaya, C., & Kalkan, E. (2003). Nonlinear seismic response evaluation of tunnel form building structures. *Computers & Structures*, 81(3), 153-165.
- Benaied, B., Hemsas, M., Benanane, A., & Hentri, M. (2023). Seismic analysis of RC building frames with vertical mass and stiffness irregularities using adaptive pushover analysis. *Revista de la construcción*, 22(3), 597-612.
- Cimellaro, G. P., Giovine, T., & Lopez-Garcia, D. (2014). Bidirectional pushover analysis of irregular structures. *Journal of Structural Engineering*, 140(9), 04014059.
- Das, P. K., Dutta, S. C., & Datta, T. K. (2021). Seismic behavior of plan and vertically irregular structures: state of art and future challenges. *Natural Hazards Review*, 22(2), 04020062.
- D'Ambrisi, A., De Stefano, M., & Tanganelli, M. (2009). Use of pushover analysis for predicting seismic response of irregular buildings: a case study. *Journal of Earthquake Engineering*, 13(8), 1089-1100.
- De Stefano, M., & Mariani, V. (2014). Pushover analysis for plan irregular building structures. *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology*, 34, 429-448.
- De Stefano, M., & Pintucchi, B. (2008). A review of research on seismic behaviour of irregular building structures since 2002. *Bulletin of earthquake Engineering*, 6, 285-308.
- Elvarando, A. (2020). Pengaruh Konfigurasi dan Posisi Breis Eksentrik Terhadap Perilaku Bangunan Struktur Baja Akibat Gaya Gempa.
- Hasibuan, S. A. R. S., Ma'arif, F., & Praja, B. A. (2023). Non-Linear Behavior of Reinforced Concrete Frame Structure with Vertical Irregularities. *International Journal of Innovative Research in Computer Science and Technology*, 11(1), 45-51.
- Kalibhat, M. G., Kumar, A. Y., Kamath, K., Prasad, S. K., & Shetty, S. (2014). Seismic performance of RC frames with vertical stiffness irregularity from pushover analysis. *J. Mech. Civil Eng*, 2, 61-66.
- Kunda, P. N. (2022). Studi perbandingan perilaku struktur beton bertulang menggunakan metode stage construction dengan metode konvensional pada pembangunan gedung a lantai iv pasar sukawati (Doctoral dissertation, Universitas Mahasaraswati Denpasar).
- Laresi, Y. T. (2017). Analisis Pushover Terhadap Ketidakberaturan Struktur Gedung Universitas 9 Lantai (Doctoral dissertation, UNIVERSITAS BAKRIE).
- Mahfuzur Rahman, M. (2008). Pushover analysis of 2D frames with stiffness irregularity in vertical direction.

- Mondal, S., Rao, A. K., & Srinivas, K. (2021, July). Seismic performance assessment of vertical irregular buildings using pushover analysis. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2358, No. 1). AIP Publishing.
- Mwafy, A., & Khalifa, S. (2017). Effect of vertical structural irregularity on seismic design of tall buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 26(18), e1399.
- Primadana, I. D., & Anwar, K. (2021). Studi Perencanaan Struktur Atas Bangunan Tahan Gempa menggunakan Kolom Dan Dinding Geser Dengan Sistem Srpkm. Studi Perencanaan Struktur Atas Bangunan Tahan Gempa Menggunakan Kolom Dandinding Geser Dengan Sistem Srpkm.
- RM, R. A., Saputra, R. S., Masrilayanti, M., & Kurniawaran, R. (2023). Pushover Analysis of 6-Floors Irregular Building Structure (Case Study: Fave Hotel Building-Padang City, West Sumatra). *Riwayat: Educational Journal of History and Humanities*, 6(3), 859-871.
- Ro, K. M., Kim, M. S., & Lee, Y. H. (2022). A simplified approach to modeling vertically irregular structures for dynamic assessment. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 21(6), 2320-2329.
- Yurizka, H., & Rosyidah, A. (2020). The performance of irregular building structures using pushover analysis. *Logic: Jurnal Rancang Bangun dan Teknologi*, 20(2), 65-72.
- Yahya, E. P. A., & Pradipta, F. A. B. (2022). Asesmen dan analisa gedung eksisting (Studi kasus bangunan Johar Shopping Center Semarang) (Doctoral dissertation, Universitas Islam Sultan Agung).
- Zailani, M. (2020). Pemodelan Struktur Gedung dengan Ketidakberaturan Vertikal Menggunakan Metode Pushover Nonlinier. (Doctoral dissertation, Universitas Teknologi Indonesia).