

ANALISIS KEKAKUAN LATERAL ANTAR TINGKAT STRUKTUR PORTAL MENGGUNAKAN PENDEKATAN ELASTO-STATIS DAN VERIFIKASI NUMERIK

Caetano José Freitas¹, Yoyong Arfiadi^{2*}

¹Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No. 43, Yogyakarta

e-mail: 245119919@students.uajy.ac.id

^{2*}Departemen Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No. 44, Yogyakarta

e-mail: yoyong.ar@uajy.ac.id

ABSTRAK

Kekakuan lateral antar tingkat merupakan parameter penting dalam evaluasi kinerja seismik bangunan karena berhubungan dengan potensi terbentuknya mekanisme *soft story*. Kekakuan rendah pada suatu tingkat dapat menyebabkan simpangan relatif besar sehingga meningkatkan risiko kerusakan. Penelitian ini menganalisis kekakuan lateral antar tingkat pada struktur portal beton bertulang dengan pendekatan elasto-statis serta membandingkannya dengan estimasi analitis menurut (Chopra 2017). Dua model ditinjau, yaitu Model A (portal 2 tingkat \times 7 bentang) dan Model B (portal 7 tingkat \times 2 bentang). Analisis numerik dilakukan dengan perangkat lunak MIDAS Gen menggunakan beban lateral seragam 10 kN pada setiap lantai dengan asumsi elastis penuh tanpa retak. Nilai kekakuan dihitung dari simpangan relatif antar lantai dan dibandingkan dengan hasil analitis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekakuan elasto-statis bervariasi antar lantai dengan kecenderungan lebih besar pada tingkat bawah, sedangkan estimasi analitis menghasilkan nilai konstan. Pada Model A, rasio kekakuan elasto-statis terhadap analitis berkisar 45.07 % - 62.46 %, sedangkan pada Model B lebih rendah, yaitu 29.38 % - 57.44 %. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa pendekatan analitis cenderung optimistik karena mengasumsikan kondisi elastis penuh tanpa memperhitungkan retak maupun interaksi deformasi antar elemen. Penelitian ini memberikan kontribusi dengan menyajikan perbandingan kuantitatif antara dua pendekatan pada konfigurasi portal yang berbeda, sekaligus menunjukkan implikasi praktis terhadap penerapan SNI 1726:2019 dan SNI 2847:2019. Dengan demikian, hasil studi ini dapat menjadi dasar bagi evaluasi kinerja struktur portal yang lebih representatif, serta menegaskan pentingnya integrasi analisis numerik dalam mendukung estimasi awal berbasis formulasi analitis.

Kata kunci: Kekakuan antar tingkat, Struktur portal, Pendekatan elasto-statis, Analisis numerik, *soft story*

1. PENDAHULUAN

Kekakuan lateral antar tingkat merupakan parameter penting dalam evaluasi kinerja seismik struktur gedung. Nilai kekakuan yang terlalu rendah pada suatu tingkat dapat memicu terbentuknya mekanisme *soft story*, yang berbahaya karena meningkatkan simpangan relatif dan risiko kerusakan struktural. Oleh karena itu, evaluasi metode estimasi kekakuan antar tingkat menjadi krusial untuk memastikan keamanan struktur. (Chopra 2017) memberikan formulasi analitis untuk mengestimasi kekakuan antar tingkat berdasarkan sifat penampang dan geometri elemen portal. Namun, formulasi tersebut didasarkan pada asumsi elastis penuh tanpa mempertimbangkan kondisi retak pada elemen beton bertulang, sehingga hasil estimasi cenderung lebih besar dibanding kondisi aktual. Temuan serupa juga dilaporkan oleh (Kwon and Ghannoum 2016) yang mengevaluasi ketentuan standar internasional pada bangunan RC bertingkat, di mana estimasi kekakuan yang diberikan oleh kode cenderung lebih besar dibandingkan hasil analisis numerik maupun eksperimental. Kasus gempa terbaru menunjukkan bahwa keruntuhan *soft story* pada struktur RC masih menjadi mekanisme kegagalan dominan (Zhang et al. 2024). Selain pendekatan analitis dan elasto-statis, beberapa studi menggunakan analisis dinamik nonlinier seperti *time history analysis* untuk menilai kinerja seismik bangunan residensial (Freitas 2025).

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas kekakuan antar tingkat dengan pendekatan analitis maupun numerik, tetapi masih terbatas pada model tertentu. Belum banyak kajian yang secara langsung membandingkan hasil formulasi Chopra dengan hasil analisis numerik elasto-statis pada model portal dengan konfigurasi yang berbeda, khususnya portal rendah-lebar dan portal tinggi-ramping.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis kekakuan lateral antar tingkat dengan menggunakan dua model portal beton bertulang, yaitu Model A berupa portal 2 tingkat dengan 7 bentang dan Model B berupa portal 7 tingkat dengan 2 bentang. Analisis dilakukan dengan pendekatan elasto-statis menggunakan perangkat lunak MIDAS Gen dan dibandingkan dengan hasil estimasi analitis menurut (Chopra 2017). Permasalahan utama yang dikaji adalah sejauh mana perbedaan nilai kekakuan antar tingkat yang diperoleh dari metode analitis dan numerik, serta implikasinya terhadap evaluasi kinerja struktur.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Kekakuan lateral antar tingkat merupakan salah satu parameter penting dalam evaluasi kinerja seismik struktur bangunan.(Chopra 2017) menyajikan formulasi analitis untuk memperkirakan kekakuan antar tingkat berdasarkan parameter penampang dan tinggi lantai, yang hingga kini banyak digunakan sebagai acuan awal dalam analisis struktur.Model-model prediksi simpangan antar tingkat terbaru berbasis pendekatan kontinu juga dikembangkan (Suliman and Lu 2024), yang menegaskan perlunya perbandingan dengan formulasi analitis klasik.(Hibbeler and Tan 2006) melalui teori mekanika struktur menekankan bahwa distribusi deformasi pada sistem portal sangat dipengaruhi oleh kekakuan relatif elemen kolom dan balok. Implementasi komputasi dari prinsip ini dalam analisis struktur sering dilakukan menggunakan metode matriks kekakuan (Arfiadi 2011), yang menjadi dasar bagi perangkat lunak elemen hingga.

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa nilai kekakuan yang dihitung secara analitis dengan asumsi elastis penuh seringkali lebih besar dibandingkan dengan hasil analisis numerik atau pengujian eksperimental (Schultz 1992) dan (Hosseini and Imagh-e-Naiini 1999) mengusulkan metode pendekatan cepat untuk memperkirakan kekakuan, namun hasilnya masih perlu diverifikasi secara numerik. Lebih lanjut, (Vijayanarayanan et al. 2015, 2017) menekankan pentingnya identifikasi ketidakberaturan kekakuan antar tingkat sebagai salah satu indikator potensi keruntuhan seismik.Namun, kajian terdahulu umumnya hanya fokus pada formulasi analitis atau simulasi numerik secara terpisah. Belum banyak penelitian yang secara langsung membandingkan keduanya pada konfigurasi portal dengan karakteristik yang berbeda.

Penelitian terbaru juga memperkuat temuan tersebut.(Gwalani et al. 2022) menunjukkan bahwa proporsi kekakuan lateral yang tidak seimbang dapat mempengaruhi respons seismik gedung.(Mehta and Chey 2023) melaporkan bahwa ketidakaturan geometrik menghasilkan distribusi kekakuan antar tingkat yang tidak merata, sementara (Manos et al. 2022) menyoroti pentingnya retrofitting pada bangunan *soft story* untuk meningkatkan kapasitas lateral. Penelitian lain juga menerapkan analisis dinamik nonlinier berbasis *time history* untuk mengevaluasi kinerja seismik pada bangunan sederhana, menunjukkan pentingnya mempertimbangkan efek inelastisitas dalam prediksi kekakuan (Freitas 2025)

Di sisi lain, standar perencanaan seperti (Badan Standardisasi Nasional 2019a) dan (Badan Standardisasi Nasional 2019b) menekankan pentingnya pengendalian simpangan antar tingkat sebagai salah satu kriteria kinerja struktur. Meskipun demikian, panduan yang membahas secara langsung perbandingan antara formulasi analitis klasik seperti (Chopra 2017) dan hasil analisis numerik elasto-statis pada kondisi cracked section masih sangat terbatas.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini difokuskan untuk mengisi celah tersebut dengan melakukan analisis komparatif antara hasil estimasi analitis (Chopra 2017) dan hasil analisis numerik elasto-statis pada dua konfigurasi portal beton bertulang yang berbeda, yaitu portal rendah-lebar (Model A: 2 tingkat, 7 bentang) dan portal tinggi-ramping (Model B: 7 tingkat, 2 bentang).

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan elasto-statis untuk menganalisis kekakuan lateral antar tingkat pada struktur portal beton bertulang. Dua model portal digunakan dengan konfigurasi sebagai berikut:

- a) Model A: portal 2 tingkat dengan 7 bentang, mewakili konfigurasi portal rendah dan lebar dengan jumlah kolom relatif banyak.
- b) Model B: portal 7 tingkat dengan 2 bentang, mewakili konfigurasi portal tinggi dan ramping dengan jumlah kolom lebih sedikit.

Untuk keperluan analisis yang terukur, properti material dan dimensi elemen struktur untuk kedua model didefinisikan secara spesifik. Modulus elastisitas beton (E) yang digunakan adalah 25742.96 MPa. Tinggi antar lantai (H) untuk semua tingkat pada kedua model adalah 4 meter. Model A (portal 2 tingkat, 7 bentang) menggunakan kolom dengan dimensi 400 mm x 400 mm dan balok dengan dimensi 300 mm x 500 mm. Jumlah kolom per lantai adalah 8 buah. Model B (portal 7 tingkat, 2 bentang) menggunakan kolom dengan dimensi 400 mm x 400 mm dan balok dengan dimensi 300 mm x 500 mm. Jumlah kolom per lantai adalah 3 buah. Dengan definisi yang jelas ini, perhitungan nilai kekakuan analitis menurut (Chopra 2017) dapat dilakukan secara konsisten.

Setelah model struktur ditetapkan, tahap berikutnya adalah penerapan beban lateral seragam untuk memperoleh respons simpangan antar tingkat. Kedua model dimodelkan menggunakan perangkat lunak MIDAS Gen dengan asumsi sebagai berikut:

- a) Semua elemen struktur dianggap dalam kondisi elastis penuh (uncracked section), sehingga retak pada kolom maupun balok tidak diperhitungkan.

- b) Beton dimodelkan sebagai material homogen dan isotropis dengan modulus elastisitas E sesuai nilai yang digunakan dalam perhitungan.
- c) Tinggi antar lantai konstan sebesar H meter pada setiap tingkat.
- d) Beban lateral seragam sebesar 10 kN diterapkan pada setiap lantai.
- e) Analisis dilakukan dengan asumsi uncracked section (elastis penuh). Dengan demikian, retak pada elemen beton bertulang tidak diperhitungkan. Asumsi ini digunakan untuk menyederhanakan perhitungan dasar, namun berpotensi menghasilkan nilai kekakuan yang lebih tinggi dibanding kondisi aktual.

Respons struktur akibat pembebanan tersebut kemudian dihitung untuk mendapatkan nilai kekakuan antar tingkat. Perhitungan dilakukan dengan dua pendekatan, yakni numerik elasto-statis dan formulasi analitis.

Nilai kekakuan antar tingkat diperoleh dengan dua pendekatan:

a) **Analisis elasto-statis numerik**

Nilai kekakuan dihitung menggunakan persamaan:

$$K = \frac{V}{\delta} \quad (1)$$

di mana V adalah gaya geser lantai (dalam kN) yang dihitung dari jumlah beban lateral yang bekerja pada lantai tersebut, sedangkan δ adalah simpangan relatif antar tingkat (m).

b) **Analisis simpangan relatif antar tingkat**

Nilai simpangan relatif dihitung menggunakan persamaan:

$$\delta = \Delta_i - \Delta_{i-1} \quad (2)$$

dengan δ menyatakan simpangan relatif antar tingkat ke-i, Δ_i adalah displacement absolut pada lantai ke-i, dan Δ_{i-1} displacement absolut pada lantai ke-i-1.

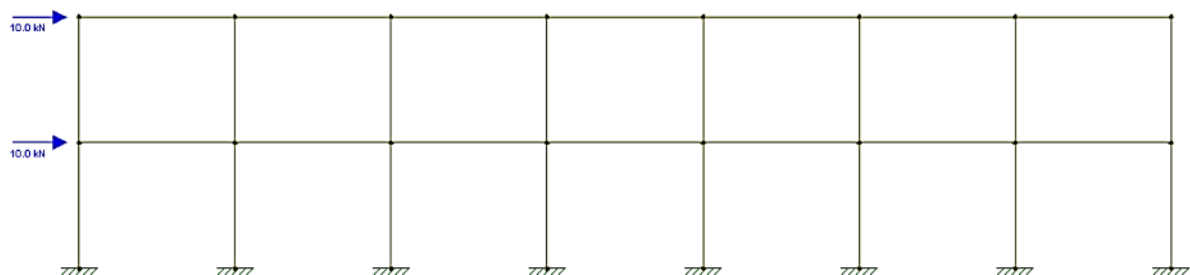
c) **Estimasi analitis Chopra (2017)**

Nilai kekakuan dihitung dengan menggunakan persamaan:

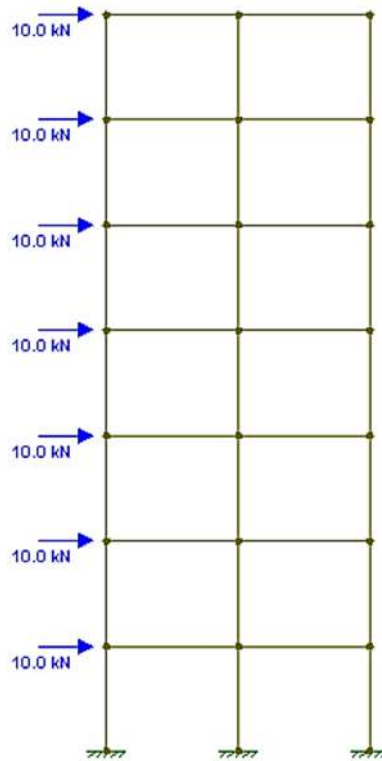
$$K = \frac{\sum 12EI}{H^3} \quad (3)$$

di mana E adalah modulus elastisitas beton (kN/m^2), I adalah momen inersia kolom (m^4), dan H adalah tinggi lantai (m). Perbandingan hasil dari kedua pendekatan ini digunakan untuk mengevaluasi deviasi nilai kekakuan antar tingkat dan mengkaji implikasinya terhadap kinerja struktur, khususnya potensi terjadinya soft story.

Kedua pendekatan ini selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi dan membandingkan nilai kekakuan antar tingkat pada Model A dan Model B.



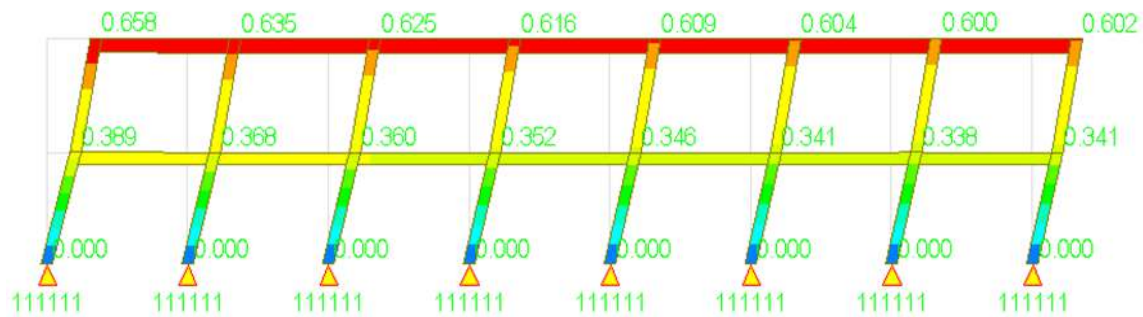
Gambar 1. Model A (dua tingkat tujuh bentang)



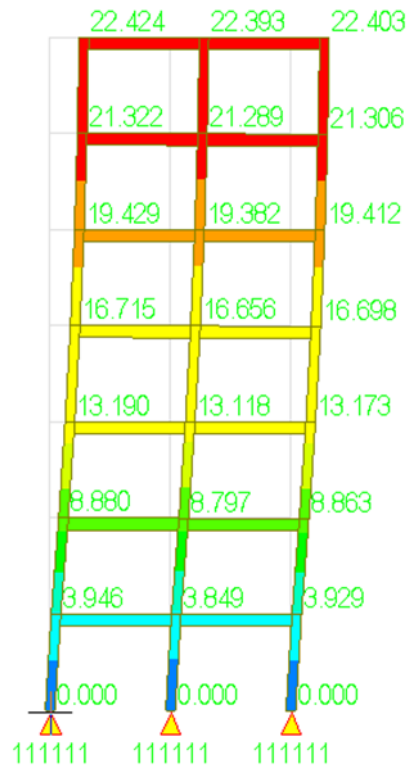
Gambar 2. Model B (tujuh tingkat dua bentang)

4. HASIL DAN PEMBAHASAAN

Analisis numerik elasto-statis dilakukan untuk menentukan kekakuan antar tingkat dengan menggunakan persamaan (1), yaitu gaya lateral dibagi simpangan relatif antar lantai. Dua model portal digunakan, yaitu **Model A** (dua tingkat dengan delapan kolom per lantai) dan **Model B** (tujuh tingkat dengan tiga kolom per lantai). Beban lateral seragam sebesar 10 kN diterapkan pada tiap lantai.



Gambar 3. Lateral displacement Model A hasil MIDAS Gen



Gambar 4. Lateral displacement Model B hasil MIDAS Gen

Nilai displacement inilah yang akan digunakan untuk menghitung Kekakuan dengan metode elasto-estatis. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai kekakuan bervariasi antar lantai, dengan kecenderungan semakin meningkat pada lantai bawah. Hal ini sesuai dengan karakteristik struktur portal, di mana lantai dasar menahan gaya lateral lebih besar sehingga memberikan respons lebih kaku. Rekapitulasi hasil perhitungan disajikan pada Tabel 1. Nilai Δ pada Tabel 1 menunjukkan simpangan antar tingkat (m) yang dihitung dari perbedaan displacement absolut antar lantai berdasarkan output MIDAS Gen.

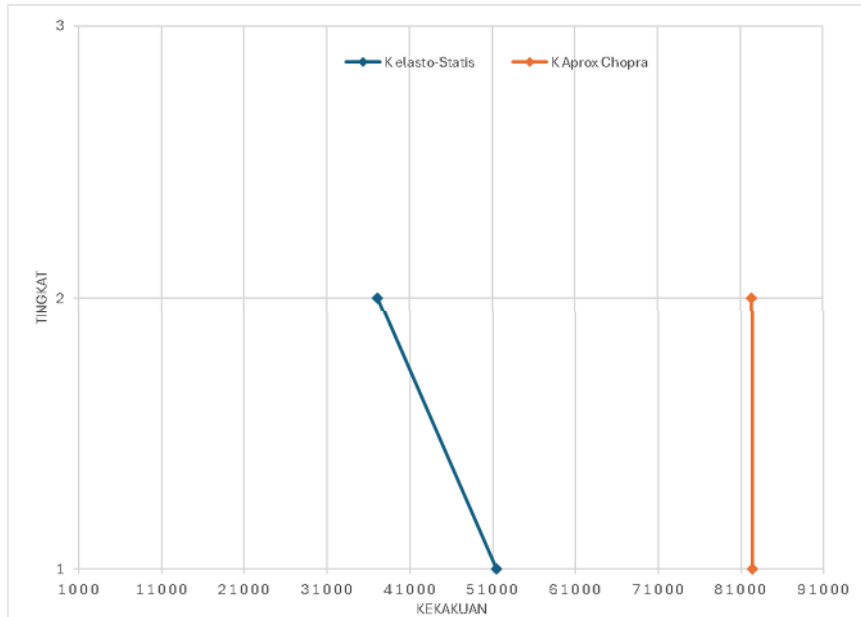
Tabel 1. Rekapitulasi Nilai kekakuan elasto-statis dan aproksimasi Chopra (2017)

Model	Tingkat	Δ (m)	δ (m)	F (kN)	V (kN)	$K=V/\delta$ (kN/m)	E	b_b	h_b	b_c	h_c	I_c	I_b	Σ Kolom	Σ Balok	L_c	L_b	$\frac{E12EI}{H^3}$ (kN/m)	Rasio (%)
A	2	0.000658	0.000269	10	10	37123.659	25742960.203	0.30	0.50	0.40	0.40	2.13E-03	3.13E-03	8	7	4.000	5.000	82377.473	45.07%
	1	0.000389	0.000389	10	20	51452.239	25742960.203	0.30	0.50	0.40	0.40	2.13E-03	3.13E-03	8	7	4.000	5.000	82377.473	62.46%
B	7	0.02242	0.001102	10	10	9076.057	25742960.203	0.30	0.50	0.40	0.40	2.13E-03	3.13E-03	3	2	4.000	5.000	30891.552	29.38%
	6	0.02132	0.001893	10	20	10567.473	25742960.203	0.30	0.50	0.40	0.40	2.13E-03	3.13E-03	3	2	4.000	5.000	30891.552	34.21%
	5	0.01943	0.002714	10	30	11052.573	25742960.203	0.30	0.50	0.40	0.40	2.13E-03	3.13E-03	3	2	4.000	5.000	30891.552	35.78%
	4	0.01671	0.003525	10	40	11346.230	25742960.203	0.30	0.50	0.40	0.40	2.13E-03	3.13E-03	3	2	4.000	5.000	30891.552	36.73%
	3	0.01319	0.004310	10	50	11601.736	25742960.203	0.30	0.50	0.40	0.40	2.13E-03	3.13E-03	3	2	4.000	5.000	30891.552	37.56%
	2	0.00888	0.004933	10	60	12162.417	25742960.203	0.30	0.50	0.40	0.40	2.13E-03	3.13E-03	3	2	4.000	5.000	30891.552	39.37%
	1	0.00394	0.003945	10	70	17745.014	25742960.203	0.30	0.50	0.40	0.40	2.13E-03	3.13E-03	3	2	4.000	5.000	30891.552	57.44%

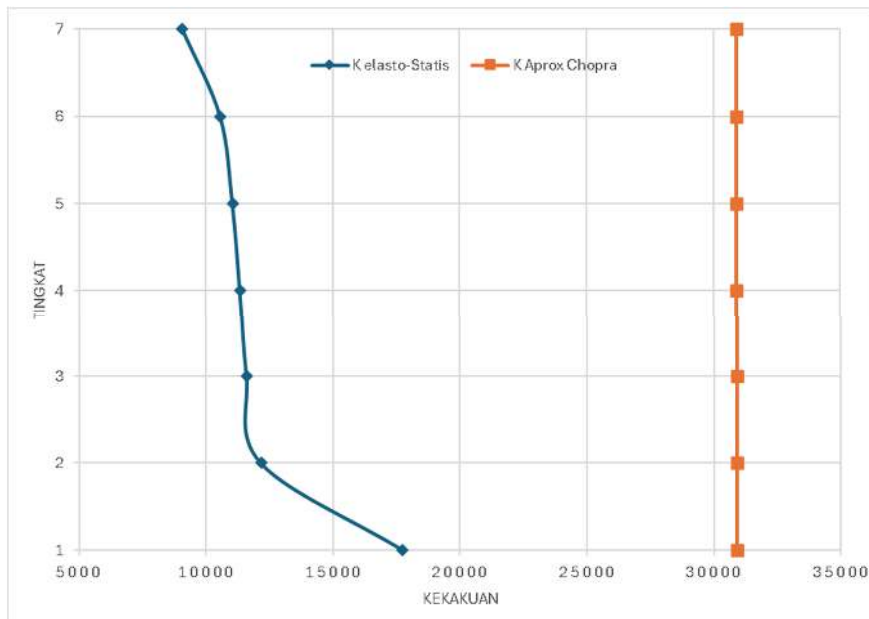
Dari Tabel 1 terlihat perbandingan antara pendekatan elasto-statis dan analitis (Chopra 2017) Pada Model B, nilai kekakuan elasto-statis berkisar antara 9076.057–17745.014 kN/m, dengan kecenderungan semakin besar di tingkat bawah. Nilai ini lebih kecil dibanding hasil pendekatan Chopra yang konstan sebesar 30891.552 kN/m.

Sementara itu, pada Model A yang terdiri dari dua tingkat, nilai kekakuan elasto-statis relatif lebih besar, yaitu 37123.659–51452.239 kN/m, tetapi masih berada di bawah nilai estimasi analitis 82377.473 kN/m.

Perbandingan ini menunjukkan bahwa pendekatan Chopra secara konsisten memberikan nilai kekakuan lebih tinggi dibandingkan hasil elasto-statis, baik pada struktur sederhana (Model A) maupun struktur bertingkat lebih banyak (Model B). Dengan demikian, formulasi Chopra dapat digunakan sebagai acuan awal, tetapi hasil analisis elasto-statis lebih merepresentasikan kondisi aktual deformasi struktur, sehingga keduanya perlu dipertimbangkan secara komplementer dalam evaluasi kekakuan lateral bangunan.



Gambar 5. Perbandingan $K_{\text{elasto-statis}}$ dan K_{aprox} pada model A



Gambar 6. Perbandingan $K_{\text{elasto-statis}}$ dan K_{aprox} pada model B

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai kekakuan antar tingkat yang diperoleh dari analisis numerik elasto-statis cenderung lebih rendah dibandingkan hasil formulasi analitis. Berdasarkan Gambar 5 dan Gambar 6, terlihat bahwa kurva hasil estimasi analitis (Chopra 2017) berupa garis vertikal konstan pada setiap lantai, sedangkan hasil analisis elasto-statis memperlihatkan variasi yang cukup signifikan antar tingkat. Perlu dicatat bahwa analisis numerik ini masih menggunakan asumsi elastis penuh (uncracked section), sehingga kekakuan struktur cenderung lebih tinggi dari kondisi aktual. Studi eksperimental juga menunjukkan bahwa retak dan pembebanan gempa berulang dapat menurunkan kekakuan secara signifikan (Ni et al. 2019).

Pada Model B, nilai K_{elasto} berada jauh di bawah K_{aprox} dengan rasio hanya sekitar 29.38 % - 57.44 % dari nilai aproksimasi. Sementara itu, pada Model A, nilai K_{elasto} relatif lebih dekat dengan K_{aprox} , yaitu sekitar 45.07 % - 62.46 %. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa pendekatan analitis memberikan estimasi yang lebih tinggi (optimistik) dibandingkan hasil numerik. Kondisi tersebut dapat menimbulkan risiko apabila digunakan sebagai satu-satunya

acuan dalam evaluasi struktur.

Fenomena ini menegaskan bahwa formulasi Chopra cenderung optimistik dalam memprediksi kekakuan antar tingkat karena mengasumsikan kondisi elastis penuh tanpa memperhitungkan retak maupun interaksi deformasi antar elemen. Temuan serupa juga dilaporkan oleh (Kwon and Ghannoum 2016) yang menunjukkan bahwa ketentuan dalam standar internasional cenderung memberikan estimasi kekakuan lebih tinggi daripada hasil analisis numerik maupun eksperimental. Perbedaan semakin nyata pada portal bertingkat banyak dengan jumlah kolom terbatas (Model B), di mana kontribusi fleksibilitas elemen lebih dominan. Sebaliknya, pada portal dengan konfigurasi yang lebih kaku dan jumlah kolom lebih banyak (Model A), hasil analitis dan numerik relatif lebih mendekati. Temuan ini memiliki implikasi praktis karena terkait langsung dengan regulasi nasional. (Badan Standardisasi Nasional 2019a) mengatur batas simpangan antar tingkat, sementara (Badan Standardisasi Nasional 2019b) menetapkan ketentuan detailing elemen struktur untuk mencegah mekanisme *soft story*. Jika hanya mengandalkan estimasi analitis, simpangan antar tingkat dapat diremehkan dan berpotensi melanggar batasan kinerja yang dipersyaratkan. Oleh karena itu, verifikasi numerik menggunakan metode elasto-statis menjadi langkah penting untuk memperoleh evaluasi kekakuan antar tingkat yang lebih representatif dan konsisten dengan ketentuan regulasi di Indonesia.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini membandingkan nilai kekakuan antar tingkat yang diperoleh melalui formulasi analitis (Chopra 2017) dan analisis numerik elasto-statis pada dua konfigurasi portal. Hasil menunjukkan adanya perbedaan signifikan, di mana nilai kekakuan analitis cenderung lebih tinggi dibandingkan hasil numerik. Pada Model A (2 tingkat \times 7 bentang), rasio K_{elasto} terhadap K_{aprox} berada pada kisaran 45.07 % - 62.46 %, sedangkan pada Model B (7 tingkat \times 2 bentang) rasio tersebut lebih rendah, yaitu hanya 29.38 % - 57.44 %.

Perbedaan ini mengindikasikan bahwa formulasi analitis memberikan estimasi yang lebih optimistik, sedangkan analisis numerik elasto-statis merepresentasikan kondisi struktur yang lebih realistis. Temuan ini menegaskan pentingnya penggunaan metode numerik sebagai verifikasi dalam kajian perilaku struktur, khususnya untuk mengantisipasi ketidakakuratan estimasi analitis dalam mendeteksi potensi mekanisme *soft story*.

Implikasi praktis dari penelitian ini berkaitan langsung dengan penerapan standar nasional. SNI 1726:2019 (Badan Standardisasi Nasional 2019a) menetapkan batas simpangan antar tingkat untuk menjaga kinerja seismik, sedangkan SNI 2847:2019 (Badan Standardisasi Nasional 2019b) mengatur detailing elemen struktur guna mencegah terbentuknya mekanisme *soft story*. Jika hanya mengandalkan hasil analitis, simpangan antar tingkat dapat diremehkan sehingga berisiko melanggar ketentuan tersebut. Oleh karena itu, penelitian ini berkontribusi dalam memberikan dasar akademis dan praktis bagi evaluasi kinerja struktur portal, serta menegaskan pentingnya integrasi pendekatan analitis dan numerik.

DAFTAR PUSTAKA

- Arfiadi, Y. 2011. "Analisis struktur dengan metode matriks kekakuan." *Cahaya Atma Pustaka*.
- Badan Standardisasi Nasional. 2019a. *SNI 1726:2019 – Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung*. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. 2019b. *SNI 2847:2019 - Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung*. Jakarta.
- Chopra, A. K. 2017. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. USA: Pearson Education.
- Freitas, C. J. 2025. "Seismic Performance of a Private Residence Building Designed with Nonlinear Time History Analysis." *Jurnal Teknik Sipil dan Arsitektur*, 30 (2): 104–111.
- Gwalani, P., Y. Singh, and H. Varum. 2022. "Effect of proportioning of lateral Stiffness in orthogonal directions on seismic performance of RC buildings." *Journal of Earthquake Engineering*, 26 (14): 7568–7586. Taylor & Francis.
- Hibbeler, R. C., and K.-H. Tan. 2006. *Structural analysis*. Pearson Prentice Hall Upper Saddle River.
- Hosseini, M., and M. R. Imagh-e-Naiini. 1999. "A quick method for estimating the lateral stiffness of building systems." *The Structural Design of Tall Buildings*, 8 (3): 247–260. Wiley Online Library.
- Kwon, J., and W. M. Ghannoum. 2016. "Assessment of international standard provisions on stiffness of reinforced concrete moment frame and shear wall buildings." *Eng Struct*, 128: 149–160. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.09.025>.
- Manos, G. C., K. Katakalos, V. Soulis, and L. Melidis. 2022. "Earthquake Retrofitting of 'Soft-Story' RC Frame Structures with RC Infills." *Applied sciences*, 12 (22): 11597. MDPI.
- Mehta, V., and M. H. Chey. 2023. "Seismic performance and assessment of RC framed structure with geometric irregularities." *Asian Journal of Civil Engineering*, 24 (2): 479–496. Springer.
- Ni, X., S. Cao, Y. Li, and S. Liang. 2019. "Stiffness degradation of shear walls under cyclic loading: experimental

- study and modelling.” *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17 (9): 5183–5216. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00682-5>.
- Schultz, A. E. 1992. “Approximating lateral stiffness of stories in elastic frames.” *Journal of Structural Engineering*, 118 (1): 243–263. American Society of Civil Engineers.
- Suliman, M., and L. Lu. 2024. “A Comparative Study of Seismic Performance Evaluation of Reinforced Concrete Frame Structures Using Chinese and African Seismic Codes.” *Advances in Civil Engineering*, 2024 (1): 5588833. Wiley Online Library.
- Vijayanarayanan, A. R., R. Goswami, and C. V. R. Murty. 2015. “Identifying stiffness irregularity in multi-storey buildings.” *Indian Concrete Institute Journal*, 19–22.
- Vijayanarayanan, A. R., R. Goswami, and C. V. R. Murty. 2017. “Estimation of storey stiffness in multi-storey buildings.” *The 16th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Zhang, X., Y. Zhou, X. Liu, Y. Zheng, and Z. Qi. 2024. “Study on seismic performance of rc frame structures considering the effect of infilled walls.” *Buildings*, 14 (7): 1907. MDPI.