

EVALUASI KEKAKUAN LATERAL TINGKAT MENGGUNAKAN METODE DEFORMASI – GAYA LATERAL

Raymond Apolinario Seran^{1*}, Yoyong Arfiadi²

^a Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia

^b Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia

ABSTRAK

Perkembangan perangkat lunak untuk analisis struktur saat ini telah sangat memudahkan dalam melakukan analisis statis untuk menghitung perpindahan lateral dan sifat dinamis (frekuensi dan bentuk modal) dalam analisis dinamis. Namun, nilai kekakuan lateral tingkat masih diestimasi menggunakan nilai kekakuan kolom sebesar $12EI/H^3$. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi nilai kekakuan kolom terhadap kekakuan lateral tingkat pada struktur bangunan rangka menggunakan metode deformasi – gaya lateral, serta menganalisis pengaruh variasi jumlah bentang dan jumlah tingkat terhadap nilai kekakuan lateral. Hasil penelitian menunjukkan metode deformasi - gaya lateral menghasilkan kekakuan yang lebih rendah dibandingkan $\Sigma 12EI/H^3$ serta memberikan gambaran kekakuan yang lebih realistis dibandingkan dengan metode tradisional yang menggunakan kekakuan kolom. Hal ini mengindikasikan bahwa nilai standar kekakuan kolom sebesar $12EI/H^3$ tidak secara langsung dapat digunakan dalam memperkirakan kekakuan lateral tingkat. Temuan ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi bangunan, koefisien kekakuan kolom akan semakin menurun, sedangkan peningkatan jumlah bentang akan menyebabkan peningkatan koefisien kekakuan kolom. Selain itu, terdapat pola distribusi kekakuan yang berbeda antara tingkat atas, tingkat antara, dan tingkat dasar, di mana kekakuan tingkat atas cenderung lebih besar dibandingkan tingkat antara namun lebih kecil dibandingkan tingkat dasar. Temuan ini memberikan wawasan penting bagi perencanaan dan desain bangunan tahan gempa, dengan penekanan pada pentingnya pemilihan metode yang tepat dalam memperkirakan kekakuan lateral tingkat.

Kata kunci: Kekakuan Kolom, Kekakuan Lateral Tingkat, Metode Deformasi-Gaya Lateral

1. PENDAHULUAN

Pengetahuan tentang kekakuan lateral dalam analisis bangunan rangka yang terkena beban lateral, dapat berguna dalam memperkirakan kekakuan lateral pada setiap tingkat. Tujuannya adalah untuk memastikan adanya ketidakberaturan kekakuan di sepanjang ketinggian bangunan dan meminimalkan perilaku struktur yang tidak diinginkan saat terjadi gempa bumi. Untuk mengatasi dampak dari ketidakberaturan kekakuan, peraturan desain seismik (Badan Standardisasi Nasional, 2019) mengkategorikan ketidakberaturan berdasarkan kekakuan tingkat lunak atau kekakuan tingkat lunak berlebihan, tergantung pada perubahan kekakuan tingkat tersebut relatif terhadap tingkat di atasnya. Setelah kategori setiap tingkat bangunan ditentukan, peraturan ini merekomendasikan tindakan lebih lanjut, termasuk memperbaiki analisis untuk memperkirakan gaya lateral desain.

Berdasarkan hal tersebut maka perkiraan kekakuan pada semua tingkat bangunan dinilai sangat penting, tetapi peraturan desain seismik saat ini tidak merekomendasikan metode khusus untuk memperkirakan kekakuan tingkat. Oleh karena itu, diperlukan pemilihan salah satu dari beberapa metode yang tersedia. Dalam penelitian yang terbaru (Vijayanarayanan, Goswami, & Murty, 2017) telah diuraikan beberapa metode yang umum digunakan untuk memperkirakan kekakuan lateral tingkat. Dalam penelitian tersebut menyebutkan bahwa metode bentuk mode dasar translasi lateral merupakan metode yang tepat untuk memperkirakan kekakuan lateral tingkat. Namun, metode ini lebih kompleks jika diterapkan untuk keperluan praktis karena menggunakan karakteristik dinamis bangunan, yang memberikan hasil akurat tetapi memerlukan perhitungan yang banyak dan memakan waktu. Metode lain yang lebih sederhana juga disebutkan adalah metode deformasi – gaya lateral yang menggunakan karakteristik perpindahan untuk memperkirakan kekakuan tingkat.

Perkembangan perangkat lunak untuk analisis struktur saat ini telah sangat memudahkan dalam melakukan analisis statis untuk menghitung perpindahan lateral dan sifat dinamis (frekuensi dan bentuk modal) dalam analisis dinamis. Namun, nilai kekakuan lateral tingkat masih diestimasi menggunakan pendekatan bangunan geser atau menggunakan nilai kekakuan kolom sebesar $12EI/H^3$. Berdasarkan uraian sebelumnya maka, dalam penelitian ini akan dievaluasi kekakuan lateral tingkat menggunakan metode

deformasi – gaya lateral dengan variasi jumlah bentang dan jumlah tingkat untuk mengetahui nilai kekakuan kolom terhadap kekakuan lateral tingkat yang dapat digunakan dalam memperkirakan kekakuan lateral tingkat.

Schultz (1992) dalam penelitiannya untuk mengidentifikasi metode bentuk tertutup yang eksplisit untuk memperkirakan kekakuan lateral lantai pada rangka elastis dengan perletakan jepit yang mengalami distribusi beban lateral yang teratur. Tiga metode yang ada (Benjamin, (1959)., Blume dkk, (1961)., Muto (1971)) diperkenalkan untuk memperkirakan kekakuan lateral balok, akan tetapi disimpulkan bahwa pendekatan tersebut hanya berlaku untuk rangka seragam dengan balok yang lebih kaku secara lentur daripada kolom. Selanjutnya sebuah metode baru diusulkan yang mencakup tiga faktor yang diturunkan secara numerik yang akan meningkatkan akurasi estimasi kekakuan untuk rangka beraturan dan tidak beraturan.

Hosseini & Imagh-e-Naiini (1999) dalam penelitiannya menyajikan metode cepat untuk memperkirakan kekakuan lateral struktur bangunan, termasuk rangka momen beraturan dan tidak beraturan, rangka bresing serta rangka dengan dinding geser, yang dapat digunakan untuk analisis awal dan terutama untuk tujuan pemeriksaan akhir. Ide dasar dari metode ini didasarkan pada beberapa fakta tentang deformasi lateral dan kekakuan struktur bangunan, yang memungkinkan untuk mempertimbangkan modul rangka satu tingkat satu bentang yang setara dengan rangka banyak tingkat dan banyak bentang yang sebenarnya.

Vijayanarayanan, Goswami, & Murty (2015) dalam penelitiannya menjelaskan tentang prosedur sederhana untuk memperkirakan kekakuan tingkat dengan menggunakan metode deformasi-gaya lateral. Metode ini dapat membantu memeriksa ketidakberaturan kekakuan pada bangunan bertingkat dengan menggunakan hasil analisis beban lateral yang sudah tersedia bagi desainer pada tahap desain. Selain itu, metode ini dapat dengan mudah digabungkan dalam perangkat lunak analisis struktur apa pun untuk menyoroti adanya ketidakberaturan kekakuan pada bangunan karena metode ini menggunakan hasil analisis perpindahan yang disediakan oleh perangkat lunak.

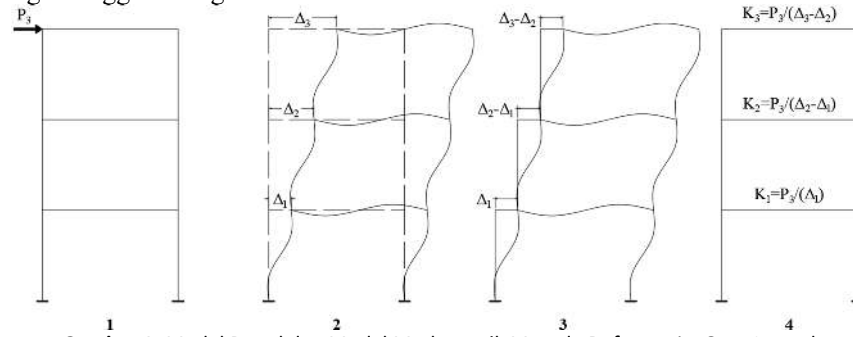
Vijayanarayanan, Goswami, & Murty (2017) dalam penelitiannya memberikan beberapa metode untuk memperkirakan kekakuan tingkat. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memastikan metode yang digunakan untuk memperkirakan kekakuan tingkat secara wajar dan akurat. Estimasi kekakuan tingkat ditentukan dari tujuh metode yang umum digunakan, yaitu *sub-assembly method*, *storey frame method*, *box frame method*, *equivalent stiffness method*, *single storey method*, *lateral force-deformation method*, dan *fundamental lateral translational mode shape method*. Di antara metode-metode tersebut, tiga metode pertama menggunakan persamaan bentuk tertutup untuk memperkirakan kekakuan tingkat, sedangkan empat metode lainnya menggunakan hasil analisis struktur untuk memperkirakan kekakuan tingkat. Kelebihan dan kekurangan masing-masing metode menunjukkan bahwa metode *fundamental lateral translational mode shape method* merupakan metode yang paling tepat untuk memperkirakan kekakuan tingkat. Hal ini karena metode tersebut menggunakan karakteristik dinamis bangunan untuk memperkirakan kekakuan tingkat, dan tidak memerlukan penyederhanaan asumsi, juga tidak memerlukan analisis tambahan, selain bentuk yang dilakukan selama proses analisis dan desain.

Vijayanarayanan, Goswami, & Murty (2017) Dalam penelitiannya menjelaskan tentang prosedur sederhana untuk memperkirakan kekakuan tingkat hanya dengan menggunakan bentuk mode dasar translasi lateral dari osilasi bangunan (menggunakan karakteristik dinamisnya, yaitu periode alami dan bentuk mode terkait). Selain itu, metode ini dapat dengan mudah digabungkan dalam perangkat lunak analisis struktur apa pun untuk menyoroti adanya ketidakberaturan kekakuan pada bangunan karena metode ini menggunakan hasil analisis modal atau pengetahuan tentang frekuensi fundamental dan bentuk mode yang disediakan oleh perangkat lunak. Selanjutnya, hasil analisis numerik menunjukkan bahwa prosedur yang diusulkan cocok untuk memperkirakan kekakuan tingkat dan dengan demikian mengidentifikasi ketidakberaturan kekakuan pada tingkat.

Metode Deformasi – Gaya Lateral

Dalam metode ini, hasil analisis struktur bangunan yang menerima beban rencana digunakan untuk memperkirakan kekakuan tingkat sebagai rasio gaya geser kumulatif tingkat terhadap perpindahan lateral antar tingkat. Metode ini tidak mengharuskan perancang untuk melakukan analisis tambahan, selain yang dilakukan selama proses analisis dan desain, untuk memperkirakan kekakuan tingkat sehingga menghemat banyak waktu dan tenaga. Namun perkiraan kekakuan tingkat bervariasi berdasarkan distribusi gaya lateral

desain sepanjang ketinggian bangunan



Gambar 1. Model Portal dan Model Mathematik Metode Deformasi – Gaya Lateral

Output perpindahan/simpangan yang diperoleh dari hasil analisis kemudian digunakan untuk mengevaluasi nilai kekakuan berdasarkan rumus,

$$K_i = \frac{P_i}{\Delta_i - (\Delta_{i-1})} \dots \dots \dots (1)$$

$$K_1 = \frac{P_1}{\Delta_1} \dots \dots \dots (2)$$

Selanjutnya koefisien kekakuan dapat dihitung berdasarkan rumus:

$$\text{Koefisien Kekakuan} = \frac{K_{i \text{ or } 1}}{N \times EI / H^3} \dots \dots \dots (3)$$

Keterangan:

N = Jumlah kolom pada tingkat ke-i atau tingkat ke-1.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Data yang digunakan dalam penelitian diuraikan sebagai berikut:

Material

Spesifikasi material beton bertulang;

Kuat tekan beton	=	25.00	MPa
Elastisitas (Ec)	=	23500.00	MPa
Massa Beton	=	2.40	kN/m ³
Berat Beton	=	23.54	kN/m ³

Dimensi

Dimensi elemen struktur yang digunakan dalam penelitian ini diestimasi berdasarkan standar minimum (SNI 2847-2019) yaitu sebagai berikut:

Balok;

Bentang balok	=	6000.00	mm
Tebal balok (hb)	=	500.00	mm
Lebar balok (bb)	=	300.00	mm
Inersia balok (Ib)	=	1125000000.00	mm ⁴

Kolom;

Tebal kolom (hc)	=	400.00	mm
Lebar kolom (bc)	=	400.00	mm
Inersia kolom	=	213333333.30	mm ⁴
Tinggi kolom	=	4000.00	mm
Ic/Lc	=	533333.33	
Ib/Lb	=	187500.00	
Ic/Lc ≥ Ib/Lb	=	OK	

Pembebanan

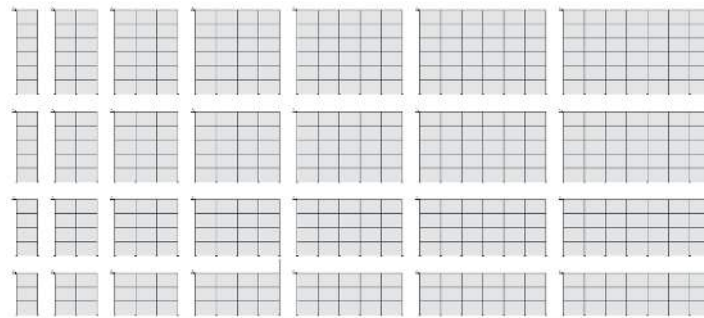
Aksi Tetap - Berat Sendiri (DL)

Perhitungan pembebanan untuk berat sendiri struktur akan diabaikan karena dalam analisis struktur menggunakan program yang secara otomatis akan menghitung berat sendiri struktur.

Aksi Lingkungan - Beban Lateral (LL)

Beban lateral (LL) = 1.00 kN

Model yang akan dianalisis adalah model plane frame dengan variasi jumlah bentang satu sampai tujuh bentang dan variasi jumlah tingkat tiga sampai enam tingkat sehingga jumlah model yang akan dianalisis adalah 28 model *plane frame*. Dalam analisis akan dilakukan *constraint* terhadap derajat kebebasan U1 atau searah sumbu horizontal di tiap tingkat untuk mendapatkan perpindahan yang sama di tiap tingkat.



Gambar 2. Model *plane frame* dengan beban lateral diberikan di lantai atas

Dari hasil analisis struktur dengan SAP2000 kemudian diperoleh perpindahan di tiap tingkat dengan berbagai variasi bentang dan tingkat dalam pemodelan struktur. Kemudian dapat dihitung nilai kekakuan tingkat dengan metode deformasi – gaya lateral.

Dari hasil analisis nilai kekakuan tingkat dengan metode deformasi – gaya lateral selanjutnya dapat dilakukan evaluasi terhadap nilai kekakuan kolom yang sering digunakan dalam analisis sebesar $12EI/H^3$

Mengacu pada hasil analisis kemudian dapat diketahui:

- A. Rasio perbandingan kekakuan lateral
 - 1) Apakah kekakuan lateral dari frame dengan satu bentang (dua kolom) sama dengan dua kali terhadap kekakuan lateral dari frame dengan tiga bentang (empat kolom)?
 - 2) Apakah kekakuan lateral dari frame dengan satu bentang (dua kolom) sama dengan tiga kali terhadap kekakuan lateral dari frame dengan lima bentang (enam kolom)?
 - 3) Apakah kekakuan lateral dari frame dengan satu bentang (dua kolom) sama dengan empat kali terhadap kekakuan lateral dari frame dengan tujuh bentang (delapan kolom)?
- B. Selisih rasio perbandingan kekakuan lateral
- C. Kontribusi jumlah bentang terhadap nilai kekakuan lateral

3. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Output nilai perpindahan lateral tingkat untuk tiap variasi jumlah bentang dan jumlah tingkat disajikan kedalam tabel.

Tabel 3. Output nilai perpindahan lateral tingkat

Tingkat (i)	Simpangan (X) (m)						
	Jumlah Bentang						
	1	2	3	4	5	6	7
3	4.02E-4	2.37E-4	1.67E-4	1.29E-4	1.05E-4	8.87E-5	7.67E-5
2	2.60E-4	1.55E-4	1.09E-4	8.46E-5	6.90E-5	5.83E-5	5.04E-5
1	1.04E-4	6.32E-5	4.52E-5	3.53E-5	2.89E-5	2.45E-5	2.13E-5
4	5.79E-4	3.35E-4	2.35E-4	1.81E-4	1.47E-4	1.24E-4	1.07E-4
3	4.33E-4	2.52E-4	1.77E-4	1.36E-4	1.11E-4	9.35E-5	8.08E-5
2	2.66E-4	1.57E-4	1.11E-4	8.54E-5	6.96E-5	5.88E-5	5.08E-5
1	1.04E-4	6.34E-5	4.54E-5	3.54E-5	2.90E-5	2.46E-5	2.13E-5
5	7.63E-4	4.36E-4	3.04E-4	2.34E-4	1.90E-4	1.60E-4	1.38E-4
4	6.13E-4	3.51E-4	2.45E-4	1.89E-4	1.53E-4	1.29E-4	1.11E-4

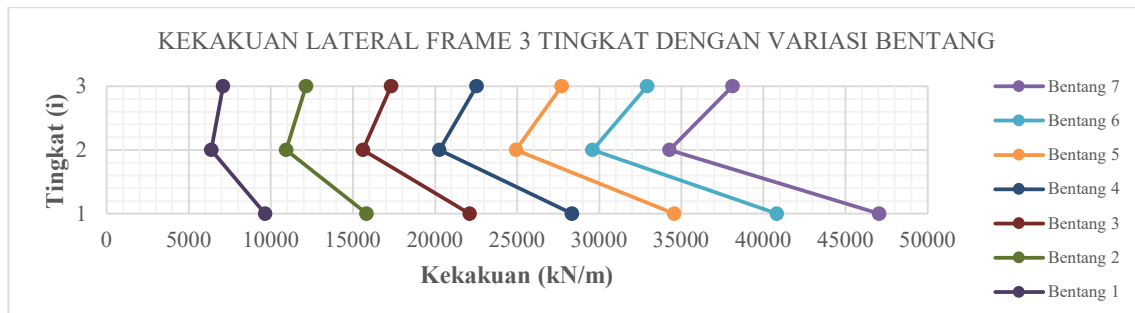
3	4.41E-4	2.55E-4	1.78E-4	1.37E-4	1.12E-4	9.40E-5	8.12E-5
2	2.68E-4	1.57E-4	1.11E-4	8.56E-5	6.98E-5	5.89E-5	5.09E-5
1	1.05E-4	6.54E-5	4.54E-5	3.54E-5	2.90E-5	2.46E-5	2.13E-5
6	9.57E-4	5.39E-4	3.74E-4	2.87E-4	2.33E-4	1.96E-4	1.69E-4
5	8.02E-4	4.53E-4	3.15E-4	2.41E-4	1.96E-4	1.65E-4	1.42E-4
4	6.24E-4	3.55E-4	2.47E-4	1.90E-4	1.54E-4	1.30E-4	1.12E-4
3	4.46E-4	2.56E-4	1.79E-4	1.38E-4	1.12E-4	9.42E-5	8.13E-5
2	2.70E-4	1.58E-4	1.11E-4	8.57E-5	6.98E-5	5.89E-5	5.10E-5
1	1.05E-4	6.37E-5	4.55E-5	3.54E-5	2.90E-5	2.46E-5	2.13E-5

Berdasarkan hasil output nilai perpindahan lateral tingkat dengan variasi jumlah bentang dan jumlah tingkat kemudian dapat ditarik beberapa kesimpulan yang diuraikan sebagai berikut:

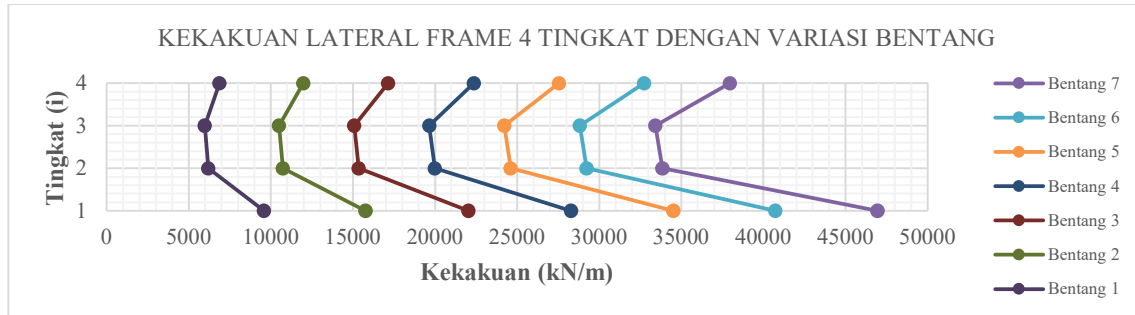
- Perubahan simpangan (X): Pada setiap tingkat, terdapat pola penurunan nilai simpangan seiring dengan bertambahnya jumlah bentang. Ini menunjukkan bahwa semakin besar jumlah bentang, semakin kecil nilai simpangan.
- Perbandingan antara tingkat: Tingkat yang lebih tinggi memiliki simpangan yang lebih besar pada setiap jumlah bentang dibandingkan tingkat yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi tingkatnya, semakin besar simpangannya, tetapi tren penurunannya tetap berlaku untuk semua tingkat.

Tabel 4. Nilai kekakuan lateral tingkat dengan metode deformasi – gaya lateral

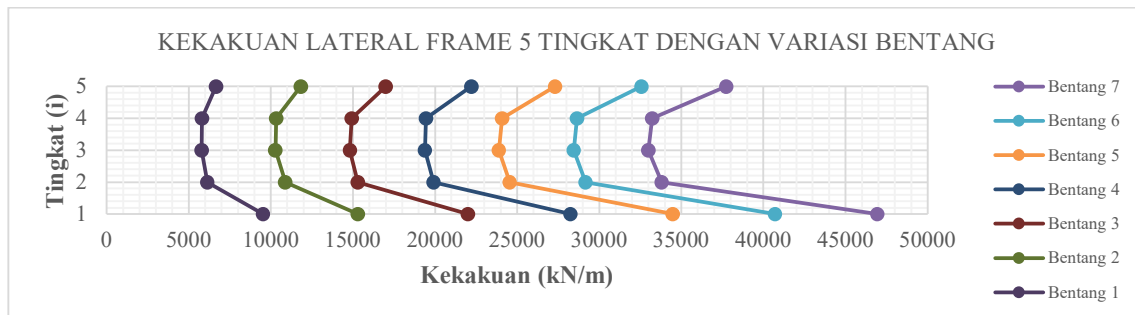
Tingkat (i)	Kekakuan Lateral SAP2000 (K) (kN/m)						
	Jumlah Bentang						
	1	2	3	4	5	6	7
3	7082.15	12150.67	17331.02	22537.75	27723.87	32927.23	38124.29
2	6377.55	10934.94	15610.37	20263.42	24931.44	29594.55	34270.05
1	9652.51	15835.31	22104.33	28344.67	34578.15	40816.33	47036.69
4	6872.85	11990.41	17152.66	22371.36	27548.21	32733.22	37965.07
3	5980.86	10493.18	15082.96	19650.23	24224.81	28818.44	33411.29
2	6195.79	10729.61	15353.91	19980.02	24606.30	29239.77	33863.87
1	9578.54	15772.87	22041.00	28280.54	34506.56	40733.20	46948.36
5	6675.57	11834.32	17006.80	22222.22	27322.40	32573.29	37735.85
4	5800.46	10341.26	14925.37	19455.25	24096.39	28653.30	33233.63
3	5790.39	10277.49	14814.81	19379.84	23894.86	28449.50	32992.41
2	6131.21	10887.32	15299.88	19920.32	24539.88	29171.53	33795.20
1	9523.81	15302.22	22007.04	28248.59	34482.76	40700.04	46926.33
6	6451.61	11641.44	16835.02	21978.02	27173.91	32467.53	37593.98
5	5624.30	10204.08	14771.05	19342.36	23923.44	28490.03	33003.30
4	5592.84	10111.22	14641.29	19193.86	23696.68	28224.67	32829.94
3	5698.01	10204.08	14727.54	19282.68	23832.22	28360.75	32905.56
2	6075.33	10632.64	15267.18	19880.72	24503.80	29129.04	33749.58
1	9487.67	15710.92	21978.02	28216.70	34447.12	40683.48	46904.32



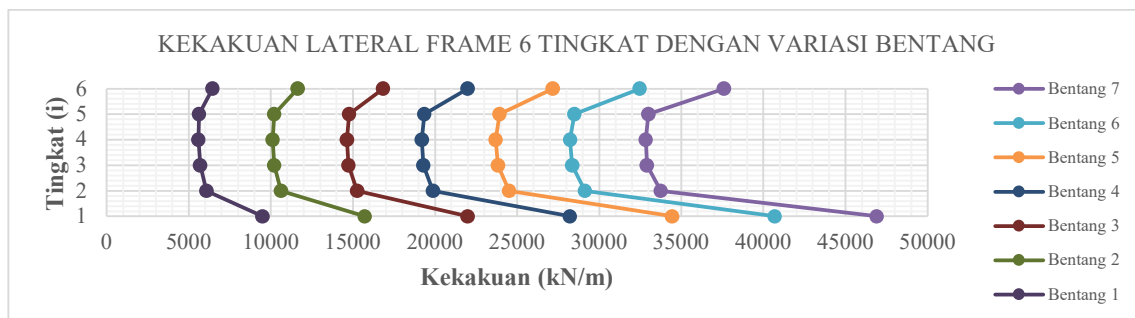
Gambar 3. Grafik kekakuan lateral frame tiga tingkat dengan variasi bentang



Gambar 4. Grafik kekakuan lateral frame empat tingkat dengan variasi bentang



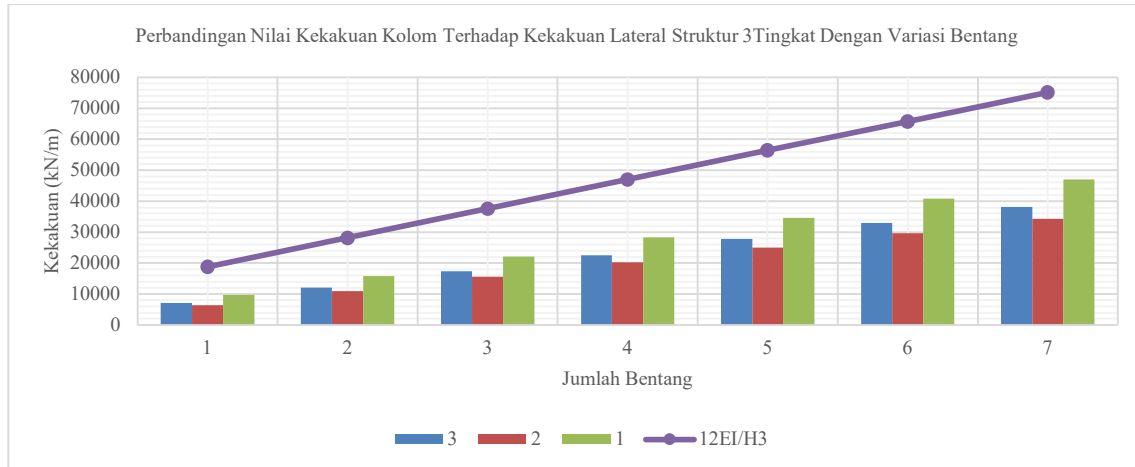
Gambar 5. Grafik kekakuan lateral frame lima tingkat dengan variasi bentang



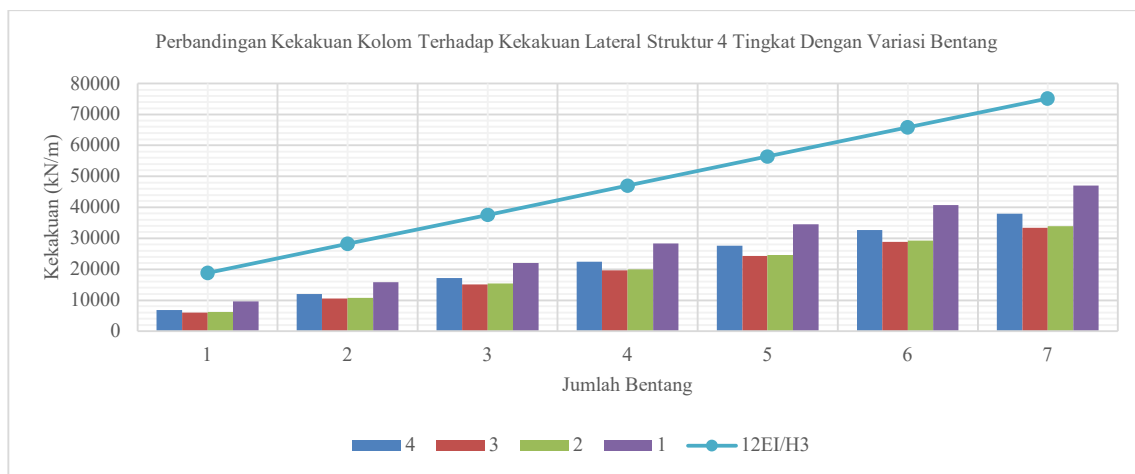
Gambar 6. Grafik kekakuan lateral frame enam tingkat dengan variasi bentang

Berdasarkan tabel dan grafik kekakuan lateral tingkat dengan variasi jumlah bentang dan jumlah tingkat, kemudian dapat ditarik beberapa kesimpulan yang diuraikan sebagai berikut:

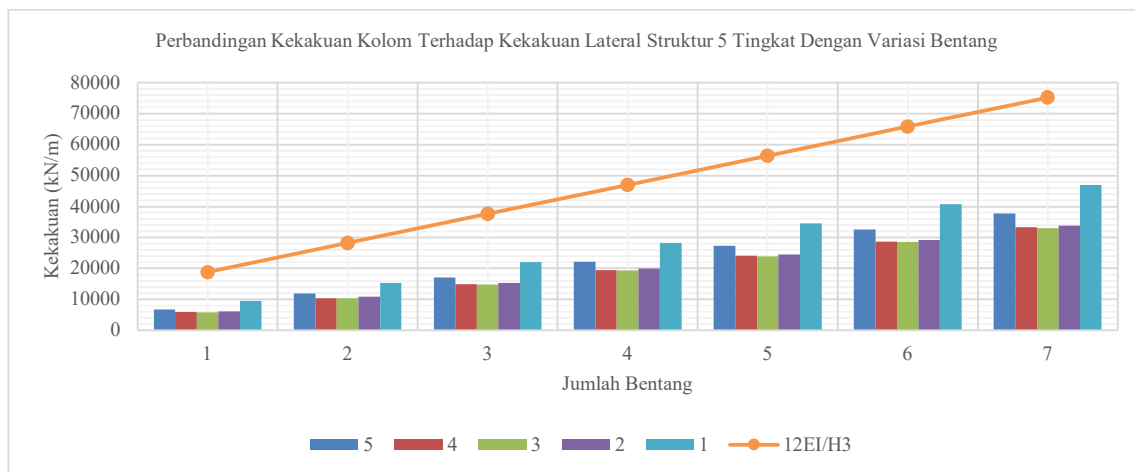
1. Kekakuan lateral meningkat seiring penambahan bentang.
2. Tingkat yang lebih rendah cenderung memiliki kekakuan lateral yang lebih tinggi dibandingkan dengan tingkat yang lebih tinggi untuk jumlah bentang yang sama.
3. Pola peningkatan kekakuan relatif serupa untuk setiap tingkat, dengan peningkatan yang konsisten saat jumlah bentang bertambah. Pola tersebut dapat dibedakan pada tingkat atas, tingkat antara dan tingkat dasar.



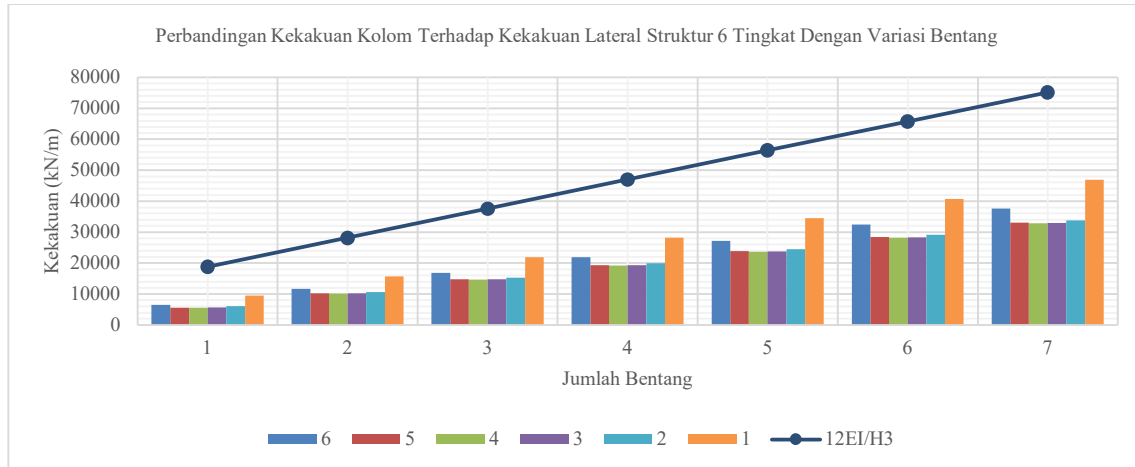
Gambar 7. Perbandingan kekakuan kolom terhadap kekakuan lateral struktur tiga tingkat dengan variasi bentang



Gambar 8. Perbandingan kekakuan kolom terhadap kekakuan lateral struktur empat tingkat dengan variasi bentang



Gambar 9. Perbandingan kekakuan kolom terhadap kekakuan lateral struktur lima tingkat dengan variasi bentang



Gambar 10. Perbandingan kekakuan kolom terhadap kekakuan lateral struktur enam tingkat dengan variasi bentang

Tabel 5. Perbandingan kekakuan lateral tingkat hasil analisis SAP2000 dan $12EI/H^3$

Ting -kat (i)	1 Bentang			2 Bentang			3 Bentang			4 Bentang		
	$\Sigma 12EI/H^3$ (kN/m)	$K_{lateral}$ (kN/m)	Selisih (%)	$\Sigma 12EI/H^3$ (kN/m)	$K_{lateral}$ (kN/m)	Selisih (%)	$\Sigma 12EI/H^3$ (kN/m)	$K_{lateral}$ (kN/m)	Selisih (%)	$\Sigma 12EI/H^3$ (kN/m)	$K_{lateral}$ (kN/m)	Selisih (%)
3	18800.00	7082.15	-165.46	28200.00	12150.67	-132.09	37600.00	17331.02	-116.95	47000.00	22537.75	-108.54
2	18800.00	6377.55	-194.78	28200.00	10934.94	-157.89	37600.00	15610.37	-140.87	47000.00	20263.42	-131.95
1	18800.00	9652.51	-94.77	28200.00	15835.31	-78.08	37600.00	22104.33	-70.10	47000.00	28344.67	-65.82
4	18800.00	6872.85	-173.54	28200.00	11990.41	-135.19	37600.00	17152.66	-119.21	47000.00	22371.36	-110.09
3	18800.00	5980.86	-214.34	28200.00	10493.18	-168.75	37600.00	15082.96	-149.29	47000.00	19650.23	-139.18
2	18800.00	6195.79	-203.43	28200.00	10729.61	-162.82	37600.00	15353.91	-144.89	47000.00	19980.02	-135.24
1	18800.00	9578.54	-96.27	28200.00	15772.87	-78.79	37600.00	22041.00	-70.59	47000.00	28280.54	-66.19
5	18800.00	6675.57	-181.62	28200.00	11834.32	-138.29	37600.00	17006.80	-121.09	47000.00	22222.22	-111.50
4	18800.00	5800.46	-224.11	28200.00	10341.26	-172.69	37600.00	14925.37	-151.92	47000.00	19455.25	-141.58
3	18800.00	5790.39	-224.68	28200.00	10277.49	-174.39	37600.00	14814.81	-153.80	47000.00	19379.84	-142.52
2	18800.00	6131.21	-206.63	28200.00	10887.32	-159.02	37600.00	15299.88	-145.75	47000.00	19920.32	-135.94
1	18800.00	9523.81	-97.40	28200.00	15302.22	-84.29	37600.00	22007.04	-70.85	47000.00	28248.59	-66.38
6	18800.00	6451.61	-191.40	28200.00	11641.44	-142.24	37600.00	16835.02	-123.34	47000.00	21978.02	-113.85
5	18800.00	5624.30	-234.26	28200.00	10204.08	-176.36	37600.00	14771.05	-154.55	47000.00	19342.36	-142.99
4	18800.00	5592.84	-236.14	28200.00	10111.22	-178.90	37600.00	14641.29	-156.81	47000.00	19193.86	-144.87
3	18800.00	5698.01	-229.94	28200.00	10204.08	-176.36	37600.00	14727.54	-155.30	47000.00	19282.68	-143.74
2	18800.00	6075.33	-209.45	28200.00	10632.64	-165.22	37600.00	15267.18	-146.28	47000.00	19880.72	-136.41
1	18800.00	9487.67	-98.15	28200.00	15710.92	-79.49	37600.00	21978.02	-71.08	47000.00	28216.70	-66.57

Tabel 6. Perbandingan kekakuan lateral tingkat hasil analisis SAP2000 dan $12EI/H^3$ (lanjutan)

Ting -kat (i)	5 Bentang			6 Bentang			7 Bentang		
	$\Sigma 12EI/H^3$ (kN/m)	$K_{lateral}$ (kN/m)	Selisih (%)	$\Sigma 12EI/H^3$ (kN/m)	$K_{lateral}$ (kN/m)	Selisih (%)	$\Sigma 12EI/H^3$ (kN/m)	$K_{lateral}$ (kN/m)	Selisih (%)
3	56400.00	27723.87	-103.43	65800.00	32927.23	-99.83	75200.00	38124.29	-97.25
2	56400.00	24931.44	-126.22	65800.00	29594.55	-122.34	75200.00	34270.05	-119.43
1	56400.00	34578.15	-63.11	65800.00	40816.33	-61.21	75200.00	47036.69	-59.88
4	56400.00	27548.21	-104.73	65800.00	32733.22	-101.02	75200.00	37965.07	-98.08
3	56400.00	24224.81	-132.82	65800.00	28818.44	-128.33	75200.00	33411.29	-125.07
2	56400.00	24606.30	-129.21	65800.00	29239.77	-125.04	75200.00	33863.87	-122.07
1	56400.00	34506.56	-63.45	65800.00	40733.20	-61.54	75200.00	46948.36	-60.18
5	56400.00	27322.40	-106.42	65800.00	32573.29	-102.01	75200.00	37735.85	-99.28
4	56400.00	24096.39	-134.06	65800.00	28653.30	-129.64	75200.00	33233.63	-126.28
3	56400.00	23894.86	-136.03	65800.00	28449.50	-131.29	75200.00	32992.41	-127.93
2	56400.00	24539.88	-129.83	65800.00	29171.53	-125.56	75200.00	33795.20	-122.52
1	56400.00	34482.76	-63.56	65800.00	40700.04	-61.67	75200.00	46926.33	-60.25
6	56400.00	27173.91	-107.55	65800.00	32467.53	-102.66	75200.00	37593.98	-100.03
5	56400.00	23923.44	-135.75	65800.00	28490.03	-130.96	75200.00	33003.30	-127.86
4	56400.00	23696.68	-138.01	65800.00	28224.67	-133.13	75200.00	32829.94	-129.06
3	56400.00	23832.22	-136.65	65800.00	28360.75	-132.01	75200.00	32905.56	-128.53
2	56400.00	24503.80	-130.17	65800.00	29129.04	-125.89	75200.00	33749.58	-122.82
1	56400.00	34447.12	-63.73	65800.00	40683.48	-61.74	75200.00	46904.32	-60.33

Berdasarkan tabel dan grafik perbandingan kekakuan kolom terhadap kekakuan lateral tingkat dari hasil analisis SAP2000 dengan variasi jumlah bentang dan jumlah tingkat, kemudian dapat ditarik beberapa kesimpulan yang diuraikan sebagai berikut:

1. Perbandingan kekakuan lateral:
 - A. Secara umum, terlihat bahwa nilai kekakuan lateral tingkat ($K_{lateral}$) untuk semua jumlah bentang selalu lebih kecil dibandingkan nilai $\Sigma 12EI/H^3$ yang menjadi patokan.
 - B. Nilai kekakuan lateral menunjukkan penurunan yang konsisten dari tingkat yang lebih tinggi hingga tingkat yang lebih rendah.
2. Selisih persentase:
 - A. Selisih antara $\Sigma 12EI/H^3$ dan kekakuan lateral tingkat untuk semua bentang menunjukkan nilai negatif, artinya kekakuan lateral selalu lebih kecil daripada $\Sigma 12EI/H^3$.
 - B. Selisih persentase ini umumnya lebih besar untuk tingkat-tingkat atas (n lebih besar), di mana tingkat pertama menunjukkan selisih paling kecil, dan tingkat kedua atau ketiga menunjukkan selisih terbesar.
3. Polarisasi pada jumlah bentang:

Semakin banyak bentang, perbedaan antara $\Sigma 12EI/H^3$ dan kekakuan lateral cenderung menurun, tetapi nilai persentase selisih masih tetap negatif. Ini menandakan bahwa peningkatan jumlah bentang mengurangi perbedaan relatif antara dua metode penghitungan kekakuan, tetapi kekakuan lateral tetap lebih rendah dibandingkan $\Sigma 12EI/H^3$. Terlepas dari perbedaan relatif antar kedua metode tersebut, Pola yang terjadi pada kedua metode tersebut tetap dibedakan pada tingkat atas, tingkat antara dan tingkat dasar.
4. Trend Umum:

Ada trend konsisten bahwa nilai kekakuan lateral mendekati nilai $\Sigma 12EI/H^3$ ketika jumlah bentang meningkat, meskipun tetap ada selisih signifikan terutama pada tingkat yang lebih tinggi.

Secara umum, ini mengindikasikan bahwa metode deformasi - gaya lateral menghasilkan kekakuan yang lebih rendah dibandingkan $\Sigma 12EI/H^3$ serta memberikan gambaran kekakuan yang lebih realistis dibandingkan dengan metode tradisional yang menggunakan kekakuan kolom.

Tabel 7. Evaluasi koefisien kekakuan kolom

Tingkat (i)	Koefisien Kekakuan Kolom ($K/(\Sigma EI/H^3)$)						
	Jumlah Bentang						
	1	2	3	4	5	6	7
3	4.52	5.17	5.53	5.75	5.90	6.00	6.08
2	4.07	4.65	4.98	5.17	5.30	5.40	5.47
1	6.16	6.74	7.05	7.24	7.36	7.44	7.51
4	4.39	5.10	5.47	5.71	5.86	5.97	6.06
3	3.82	4.47	4.81	5.02	5.15	5.26	5.33
2	3.95	4.57	4.90	5.10	5.24	5.33	5.40
1	6.11	6.71	7.03	7.22	7.34	7.43	7.49
5	4.26	5.04	5.43	5.67	5.81	5.94	6.02
4	3.70	4.40	4.76	4.97	5.13	5.23	5.30
3	3.70	4.37	4.73	4.95	5.08	5.19	5.26
2	3.91	4.63	4.88	5.09	5.22	5.32	5.39
1	6.08	6.51	7.02	7.21	7.34	7.42	7.49
6	4.12	4.95	5.37	5.61	5.78	5.92	6.00
5	3.59	4.34	4.71	4.94	5.09	5.20	5.27
4	3.57	4.30	4.67	4.90	5.04	5.15	5.24
3	3.64	4.34	4.70	4.92	5.07	5.17	5.25
2	3.88	4.52	4.87	5.08	5.21	5.31	5.39
1	6.06	6.69	7.01	7.20	7.33	7.42	7.48

Berdasarkan hasil evaluasi koefisien kekakuan kolom dengan variasi jumlah bentang dan jumlah tingkat, kemudian dapat ditarik beberapa kesimpulan yang diuraikan sebagai berikut:

1. Koefisien kekakuan kolom meningkat seiring penambahan bentang.
2. Tingkat yang lebih rendah cenderung memiliki koefisien yang lebih tinggi dibandingkan dengan tingkat yang lebih tinggi.

3. Terlepas dari perbedaan koefisien antar tingkat, pola peningkatan koefisien relatif serupa untuk setiap tingkat, dengan peningkatan yang konsisten saat jumlah bentang bertambah. Pola tersebut dapat dibedakan pada tingkat atas, tingkat antara dan tingkat dasar.

Secara umum hasil analisis menunjukkan nilai koefisien kekakuan kolom berada dibawah nilai 12. Tentunya hal ini dipengaruhi oleh adanya kontribusi kekakuan balok. Berdasarkan hal ini maka dapat disimpulkan bahwa nilai $12EI/H^3$ tidak secara langsung dapat digunakan dalam memperkirakan kekakuan tingkat. Penambahan jumlah tingkat akan mengakibatkan koefisien kekakuan kolom akan semakin kecil dan penambahan jumlah bentang bentang akan mengakibatkan koefisien kekakuan kolom akan semakin meningkat. tingkat struktur yang lebih rendah menunjukkan koefisien yang lebih tinggi dibandingkan tingkat yang lebih tinggi untuk jumlah bentang yang sama.

Tabel 8. Perbandingan kekakuan lateral tingkat dari frame dengan satu bentang terhadap frame dengan tiga, lima dan tujuh bentang

Tingkat (i)	Rasio Perbandingan Kekakuan Lateral			Selisih Rasio Perbandingan Kekakuan Lateral			Kontribusi Jumlah Bentang Terhadap Nilai Kekakuan		
	Jumlah Bentang			Jumlah Bentang			Jumlah Bentang		
	3 : 1	5 : 1	7 : 1	3 : 1	5 : 1	7 : 1	3 : 1	5 : 1	7 : 1
3	2.447	3.915	5.383	0.447	0.915	1.383	0.149	0.183	0.198
2	2.448	3.909	5.374	0.448	0.909	1.374	0.149	0.182	0.196
1	2.290	3.582	4.873	0.290	0.582	0.873	0.097	0.116	0.125
4	2.496	4.008	5.524	0.496	1.008	1.524	0.165	0.202	0.218
3	2.522	4.050	5.586	0.522	1.050	1.586	0.174	0.210	0.227
2	2.478	3.971	5.466	0.478	0.971	1.466	0.159	0.194	0.209
1	2.301	3.602	4.901	0.301	0.602	0.901	0.100	0.120	0.129
5	2.548	4.093	5.653	0.548	1.093	1.653	0.183	0.219	0.236
4	2.573	4.154	5.729	0.573	1.154	1.729	0.191	0.231	0.247
3	2.559	4.127	5.698	0.559	1.127	1.698	0.186	0.225	0.243
2	2.495	4.002	5.512	0.495	1.002	1.512	0.165	0.200	0.216
1	2.311	3.621	4.927	0.311	0.621	0.927	0.104	0.124	0.132
6	2.609	4.212	5.827	0.609	1.212	1.827	0.203	0.242	0.261
5	2.626	4.254	5.868	0.626	1.254	1.868	0.209	0.251	0.267
4	2.618	4.237	5.870	0.618	1.237	1.870	0.206	0.247	0.267
3	2.585	4.183	5.775	0.585	1.183	1.775	0.195	0.237	0.254
2	2.513	4.033	5.555	0.513	1.033	1.555	0.171	0.207	0.222
1	2.316	3.631	4.944	0.316	0.631	0.944	0.105	0.126	0.135

Berdasarkan perbandingan kekakuan lateral tingkat dengan variasi jumlah bentang dan jumlah tingkat, kemudian dapat ditarik beberapa kesimpulan yang diuraikan sebagai berikut:

1. Rasio Perbandingan Kekakuan Lateral:
Rasio perbandingan kekakuan lateral tidak meningkat secara linier seiring dengan bertambahnya jumlah bentang. Kekakuan lateral untuk tiga, lima, dan tujuh bentang masing-masing tidak sama dengan dua, tiga, atau empat kali lipat dari kekakuan satu bentang.
2. Selisih Rasio Perbandingan Kekakuan Lateral:
 - A. Selisih rasio perbandingan kekakuan lateral juga meningkat dengan bertambahnya jumlah bentang dan tingkat struktur. Contoh, pada tingkat keenam ($i=6$), selisih rasio untuk jumlah bentang 3:1, 5:1, dan 7:1 berturut-turut adalah 0.609, 1.212, dan 1.827. Sementara pada tingkat ketiga ($i=3$), nilai selisihnya lebih rendah.
 - B. Ini menunjukkan bahwa perbedaan kekakuan antara struktur dengan lebih banyak bentang semakin signifikan pada tingkat yang lebih tinggi.
3. Kontribusi Jumlah Bentang Terhadap Nilai Kekakuan Lateral:
 - A. Kontribusi jumlah bentang terhadap kekakuan lateral juga meningkat secara perlahan dengan bertambahnya jumlah bentang. Contoh, pada tingkat keenam ($i=6$), kontribusi bentang untuk rasio 3:1 adalah 0.203, sedangkan untuk 7:1 adalah 0.261.
 - B. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar jumlah bentang, semakin besar kontribusinya terhadap kekakuan lateral secara keseluruhan.
 - C.

4. KESIMPULAN

Hasil evaluasi kekakuan lateral tingkat menggunakan metode deformasi – gaya lateral telah dibahas dalam penelitian ini. Kesimpulan yang dapat diambil diuraikan sebagai berikut:

1. Nilai $12EI/H^3$ yang adalah kekakuan kolom tidak secara langsung dapat digunakan dalam memperkirakan kekakuan lateral tingkat. Semakin tinggi bangunan maka koefisien kekakuan kolom akan semakin kecil dan semakin banyak bentang maka koefisien kekakuan kolom akan semakin meningkat. Untuk memperkirakan kekakuan lateral tingkat maka perlu diingat bahwa koefisien kekakuan tingkat atas cenderung lebih besar dibandingkan dengan koefisien kekakuan tingkat antara dan lebih kecil dari koefisien kekakuan tingkat dasar.
2. Pengaruh variasi jumlah bentang dan jumlah tingkat terhadap nilai kekakuan lateral tingkat diuraikan sebagai berikut:
 - A. Kekakuan lateral struktur meningkat dengan jumlah bentang yang lebih banyak, namun tingkat struktur yang lebih rendah menunjukkan kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan tingkat yang lebih tinggi untuk jumlah bentang yang sama.
 - B. Penambahan jumlah tingkat akan mengakibatkan koefisien kekakuan kolom akan semakin kecil dan penambahan jumlah bentang akan mengakibatkan koefisien kekakuan kolom akan semakin meningkat.
 - C. Tingkat struktur yang lebih rendah menunjukkan koefisien yang lebih tinggi dibandingkan tingkat yang lebih tinggi untuk jumlah bentang yang sama.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Arfiadi, Y. (2011). *Analisis Struktur Dengan Metode Matriks Kekakuan*. Yogyakarta: Cahaya Atma Pustaka.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 1726:2019 (Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Nongedung)*. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 2847:2019 (Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung)*. Jakarta.
- Canale, R. P., & Chapra, S. C. (2014). *Numerical Methods for Engineers* (7th ed.). Europe: McGraw-Hill Education.
- Chopra, A. K. (2013). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. (4th ed.). USA: Pearson Education.
- Mario Paz, Young Hoon Kim. (2019). *Structural Dynamics (Theory and Computation)* (6th ed.). USA: Springer International Publishing.
- Muto, K. (1975). *Aseismic Design Analysis Of Buildings*. Tokyo: Maruzen.
- Pawirodikromo, W. (2017). *Analisis Dinamik Struktur*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Arturo E. Schultz, Associate Member, ASCE. (1992). Approximating Lateral Stiffness Of Storeys In Elastic Frames. *Journal of Structural Engineering*, 118(1), 243-263.
- Mahmood Hosseini And Mohammad Reza Imagh-E-Naiini. (1999). A Quick Method For Estimating The Lateral Stiffness Of Building Systems. *Structural Design Tall Buildings*, 8, 247-260.
- Vijayanarayanan, A. R., Goswami, R., and Murty, C. V. R. (2015). Identifying Stiffness Irregularity In Multi-Storey Building. *ICI*, 19-22.
- Vijayanarayanan, A. R., Goswami, R., and Murty, C. V. R. (2017). Estimation Of Storey Stiffness In Multi-Storey Buildings. *16WCEE 2017*, 1 - 12.

Vijayanarayanan, A. R., Goswami, R., and Murty, C. V. R. (2017). Identifying Stiffness Irregularity In Buildings Using Fundamental Lateral Mode Shape. *Earthquakes and Structures*, Vol. 12, No. 4, 437-448.