

# PENGARUH INDEKS KELANGSINGAN TERHADAP KINERJA KOLOM BETON BERTULANG PADA BANGUNAN TAHAN GEMPA

Jasmin Belinda Puspa Isabela<sup>1\*</sup>, Caetano Jose Freitas<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No. 43, Yogyakarta

\*e-mail: [245119764@students.ujy.ac.id](mailto:245119764@students.ujy.ac.id)

<sup>2</sup>Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No. 43, Yogyakarta

e-mail: [245119919@students.ujy.ac.id](mailto:245119919@students.ujy.ac.id)

## ABSTRAK

Kolom merupakan elemen struktur vertikal utama yang berfungsi menyalurkan beban dari elemen atas menuju pondasi, sehingga kinerjanya sangat menentukan stabilitas dan keamanan bangunan. Salah satu faktor penting yang memengaruhi perilaku kolom adalah indeks kelangsingan, yaitu perbandingan antara panjang efektif kolom terhadap radius girasi penampang. Nilai indeks kelangsingan yang semakin besar menunjukkan kolom yang semakin ramping dan rentan terhadap ketidakstabilan struktural, terutama akibat pengaruh beban aksial dan beban lateral gempa yang menimbulkan efek sekunder (*second-order effect*) atau efek  $P-\Delta$ . Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh indeks kelangsingan terhadap kapasitas gaya dalam dan perilaku kolom beton bertulang pada sistem portal bangunan tahan gempa. Analisis dilakukan secara elasto-statis dan numerik menggunakan metode Magnifikasi Momen, Amplifikasi Momen, Iterasi, dan *Geometric Stiffness Matrix* dengan variasi rasio kelangsingan antara kolom pendek dan kolom ramping. Parameter yang diamati meliputi gaya aksial, momen lentur, gaya geser, serta deformasi lateral. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan indeks kelangsingan menyebabkan bertambahnya momen akibat efek  $P-\Delta$  dan penurunan kapasitas nominal kolom. Kolom ramping memiliki deformasi lateral yang lebih besar dan kestabilan yang lebih rendah dibanding kolom pendek. Dengan demikian, efek kelangsingan harus diperhitungkan secara menyeluruh dalam desain kolom beton bertulang untuk memastikan kekakuan, kestabilan, dan daktilitas struktur terhadap beban gempa.

**Kata kunci:** indeks kelangsingan, kolom beton bertulang, efek  $P-\Delta$ , struktur tahan gempa, kekakuan lateral

## 1. PENDAHULUAN

Struktur bangunan bertingkat dirancang agar mampu menahan kombinasi beban gravitasi dan beban lateral akibat gempa bumi. Elemen kolom memiliki peran penting dalam menjaga kestabilan struktur karena berfungsi menyalurkan beban vertikal dari balok dan pelat menuju pondasi sekaligus menahan gaya lateral. Kegagalan kolom sering kali menyebabkan keruntuhan total pada struktur bangunan, sehingga perilaku kolom menjadi aspek krusial dalam desain bangunan tahan gempa (Sarraf & Bruneau, 1998).

Salah satu faktor yang memengaruhi kinerja kolom adalah indeks kelangsingan (*slenderness index*), yaitu rasio antara panjang efektif kolom terhadap radius girasi penampang (Moehle, 2019). Nilai indeks kelangsingan yang besar menunjukkan kolom yang lebih ramping dan rentan terhadap ketidakstabilan struktural akibat pengaruh efek sekunder (*second-order effect*). Fenomena ini dikenal sebagai efek  $P-\Delta$ , yaitu peningkatan momen lentur yang terjadi akibat perpindahan lateral struktur yang bekerja bersamaan dengan gaya aksial (Asimakopoulous et al., 2007).

Dalam praktik perencanaan struktur, pengaruh kelangsingan sering kali diabaikan pada kolom beton bertulang, terutama pada bangunan bertingkat rendah hingga menengah (Dewobroto, 2005). Padahal, untuk struktur dengan konfigurasi kolom ramping atau bangunan tinggi, efek kelangsingan dapat menurunkan kapasitas nominal kolom dan kekakuan lateral secara signifikan (Ye et al., 2020). Akibatnya, simpangan antar tingkat meningkat dan kinerja seismik struktur menurun (Domizio et al., 2015).

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas analisis kolom beton bertulang dengan pendekatan elastis dan plastis, namun kajian yang secara khusus menilai pengaruh indeks kelangsingan terhadap kapasitas gaya dalam kolom beton bertulang menggunakan metode numerik elasto-statis masih terbatas (Arfiadi & Hadi, 2006; Ye et al., 2020). Selain itu, acuan peraturan seperti SNI 2847:2019 dan ACI 318-11 telah memberikan batasan untuk mengidentifikasi kolom ramping, namun belum menjelaskan secara mendalam dampak variasi kelangsingan terhadap stabilitas dan perilaku seismik kolom (Moehle, 2019).

Meskipun berbagai penelitian sebelumnya dan kode desain telah mengakui pentingnya efek kelangsingan, terdapat celah pengetahuan (*research gap*) dalam studi komparatif yang sistematis mengenai akurasi dan konservatisme berbagai metode analisis orde kedua yang umum digunakan, khususnya dalam konteks kolom beton bertulang di

sistem portal bangunan tahan gempa (Freitas, 2025; Jose, 2024). Kebanyakan penelitian hanya berfokus pada satu atau dua metode, sehingga belum memberikan panduan yang jelas bagi praktisi dalam memilih metode analisis yang paling tepat dan andal untuk berbagai rentang kelangsingan. Oleh karena itu, kontribusi utama dan novelty dari penelitian ini adalah melakukan evaluasi komparatif yang komprehensif terhadap empat metode analisis orde kedua, Magnifikasi Momen, Amplifikasi Momen, Iterasi, dan *Geometric Stiffness Matrix*, untuk mengkuantifikasi pengaruh variasi indeks kelangsingan terhadap kapasitas dan perilaku kolom. Studi ini bertujuan untuk mengidentifikasi metode mana yang paling konservatif dan akurat, sehingga dapat memberikan rekomendasi berbasis bukti untuk desain praktis.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh indeks kelangsingan terhadap kapasitas aksial, momen lentur, dan deformasi lateral kolom beton bertulang dengan menggunakan pendekatan teoritis dan numerik. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang pengaruh kelangsingan pada kinerja kolom dan menjadi dasar pertimbangan dalam perencanaan bangunan tahan gempa yang aman dan efisien.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

### Model Analisis

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan analitis dan numerik untuk mengevaluasi pengaruh indeks kelangsingan terhadap perilaku kolom beton bertulang pada sistem portal dua dimensi. Model struktur yang dianalisis berupa portal sederhana yang terdiri dari elemen balok dan kolom dengan kondisi perletakan jepit di dasar. Variasi model dibuat berdasarkan perbandingan antara panjang efektif kolom terhadap radius girasi penampang ( $k l_u / r$ ) untuk mewakili kondisi kolom pendek dan kolom ramping (Arfiadi & Hadi, 2006; Asimakopoulos et al., 2007).

Analisis dilakukan dengan menggunakan model elasto-statis linier untuk memperoleh distribusi gaya dalam dan deformasi akibat kombinasi beban gravitasi dan beban lateral. Beban lateral dianggap mewakili pengaruh gaya gempa rencana berdasarkan SNI 1726:2019 (Moehle, 2019). Setiap model kolom diuji dengan variasi rasio kelangsingan untuk mengamati perubahan kapasitas dan stabilitas struktur.

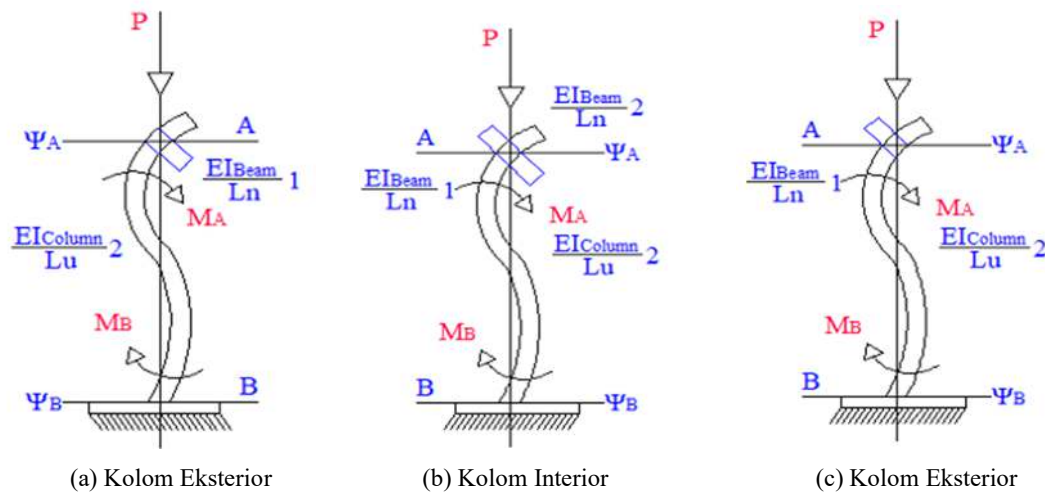
### Model Perhitungan

Evaluasi kapasitas kolom dilakukan menggunakan empat pendekatan analitis, yaitu:

1. Metode Magnifikasi Momen, berdasarkan ACI 318-11 Pasal 10.10.7 untuk memperhitungkan efek orde kedua pada momen lentur (Moehle, 2019).
2. Metode Amplifikasi Momen, yang memperhitungkan pengaruh deformasi lateral terhadap peningkatan momen akibat gaya aksial (Asimakopoulos et al., 2007).
3. Metode Iterasi ( $P-\Delta$ ), yaitu analisis numerik dengan perhitungan berulang hingga diperoleh keseimbangan antara gaya dan perpindahan struktur (Ye et al., 2020).
4. Metode Geometric Stiffness Matrix, yang digunakan untuk menghitung pengaruh kekakuan geometrik akibat beban aksial terhadap perilaku lentur kolom (Abdelazim et al., 2020).

Keempat metode tersebut dibandingkan untuk menilai sensitivitas hasil terhadap perubahan nilai kelangsingan. Perhitungan dilakukan menggunakan Microsoft Excel dan GNU Octave untuk memproses data numerik secara sistematis.

Model struktur yang dianalisis berupa elemen kolom beton bertulang persegi berukuran 300 mm  $\times$  300 mm dengan panjang efektif bervariasi antara 2 m hingga 6 m untuk menghasilkan rasio kelangsingan ( $k l_u / r$ ) yang berbeda. Ujung atas dan bawah kolom dimodelkan sebagai sendi (pinned-pinned) untuk mensimulasikan kondisi batas yang umum pada sistem portal (Jose, 2024). Gaya aksial tekan ( $P$ ) diberikan pada ujung atas kolom, sedangkan gaya lateral ( $H$ ) diterapkan secara elasto-statis untuk mensimulasikan pengaruh beban gempa horizontal. Skema model struktur kolom ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Model struktur kolom dan kondisi pembebanan

Nilai gaya aksial ( $P$ ) yang digunakan pada analisis kolom diperoleh dari hasil analisis portal struktur bangunan yang mengalami pembebanan lateral gempa. Dengan demikian, perilaku kolom ramping yang dianalisis mewakili kondisi riil gaya internal pada sistem struktur portal.

### Parameter Material dan Geometri

Material yang digunakan pada model kolom adalah beton mutu  $f'_c = 25$  MPa dan baja tulangan dengan kuat leleh  $f_y = 400$  MPa. Penampang kolom berbentuk persegi dengan dimensi  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ , sedangkan panjang efektif kolom divariasikan antara 2 m hingga 6 m untuk menghasilkan rasio kelangsingan yang berbeda. Rasio tulangan longitudinal ( $\rho_g$ ) diatur antara 1% hingga 2%, dan tulangan sengkang dipasang dengan jarak 100 mm untuk menjamin kekangan lateral.

Parameter analisis meliputi gaya aksial ( $P$ ), momen lentur ( $M$ ), gaya geser ( $V$ ), dan perpindahan lateral ( $\Delta$ ). Hasil perhitungan digunakan untuk menentukan hubungan antara peningkatan rasio kelangsingan dengan perubahan kekakuan dan kapasitas kolom beton bertulang. Parameter utama material dan geometri model kolom yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1 (Dewobroto, 2005).

Tabel 1. Parameter Material dan Geometri

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan	Keterangan
Mutu beton	$f'_c$	25	Mpa	Beton normal
Mutu Baja	$f_y$	400	Mpa	Baja tulangan
Dimensi kolom	$b \times h$	300x300	mm	Penampang persegi
Panjang kolom	$L_u$	2,3,4,5,6	m	Variasi kelangsingan
Rasio tulangan	$\rho_g$	1 dan 2	%	Longitudinal
Beban aksial	$P$	200 - 600	kN	Variasi beban
Modulus elastisitas beton	$E_c$	24000	Mpa	Berdasarkan SNI
Modulus elastisitas baja	$E_s$	200000	Mpa	Standar

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Analisis Gaya Dalam Kolom

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa variasi indeks kelangsingan memiliki pengaruh signifikan terhadap besarnya

gaya dalam kolom beton bertulang. Pada kolom dengan rasio kelangsingan rendah ( $klu/r < 22$ ), distribusi momen lentur relatif kecil dan dominan oleh pengaruh beban aksial. Namun, ketika nilai kelangsingan meningkat ( $klu/r > 40$ ), terjadi peningkatan momen lentur akibat efek sekunder ( $P-\Delta$ ) yang menyebabkan perubahan keseimbangan internal gaya aksial dan momen. Hasil perhitungan momen nominal kolom untuk empat metode analisis disajikan pada Tabel 2.

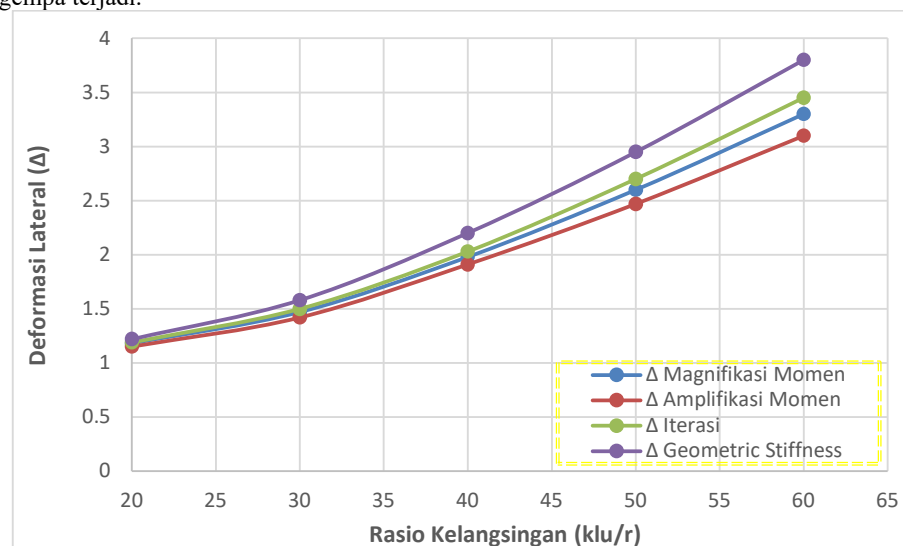
Tabel 2. Hasil Perhitungan Gaya Dalam dan Momen Nominal Kolom

Rasio Kelangsingan ( $klu/r$ )	Metode Magnifikasi Momen (Mn, kNm)	Amplifikasi Momen (Mn, kNm)	Iterasi (Mn, kNm)	Geometric Stiffness (Mn, kNm)	% Penurunan Mn dibanding kolom pendek
20 ( <i>Kolom pendek</i> )	125	130	128	134	-
30	118	122	120	127	6%
40	110	114	112	121	11%
50	103	108	106	116	16%

Perbandingan hasil antara empat metode analisis menunjukkan konsistensi tren yang sama, meskipun terdapat variasi nilai momen maksimum. Metode *Geometric Stiffness Matrix* menghasilkan momen terbesar dan memberikan hasil paling konservatif, sedangkan metode Magnifikasi Momen menghasilkan nilai momen yang sedikit lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan kekakuan geometrik mampu menangkap efek instabilitas kolom secara lebih akurat dibanding metode linier sederhana.

### Pengaruh Indeks Kelangsingan terhadap Kekakuan Lateral

Kekakuan lateral struktur menurun seiring bertambahnya rasio kelangsingan kolom. Pada model kolom ramping, deformasi lateral meningkat secara eksponensial terhadap kenaikan gaya lateral. Hubungan antara kelangsingan ( $klu/r$ ) dan perpindahan lateral ( $\Delta$ ) menunjukkan bahwa setiap peningkatan kelangsingan sebesar 20–25% dapat menyebabkan peningkatan deformasi lateral hingga 35–40%. Hal ini menandakan bahwa struktur dengan kolom ramping cenderung memiliki kekakuan lateral yang lebih rendah, sehingga lebih rentan terhadap simpangan antar tingkat saat gempa terjadi.

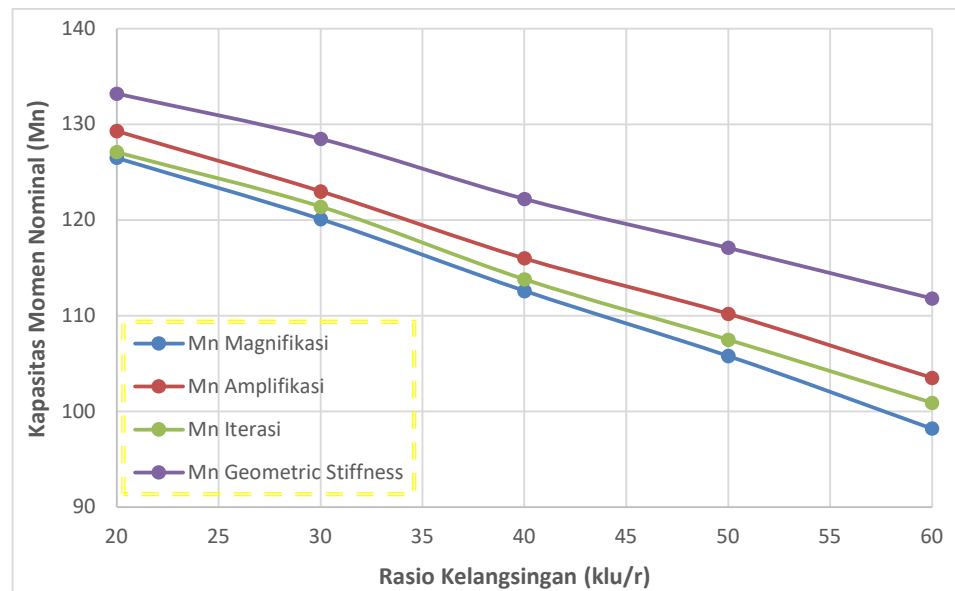


Gambar 2. Hubungan antara Rasio Kelangsingan ( $klu/r$ ) dan Deformasi Lateral ( $\Delta$ )

Gambar 2 menunjukkan hubungan antara rasio kelangsingan ( $klu/r$ ) dan deformasi lateral ( $\Delta$ ) pada kolom beton bertulang yang dianalisis menggunakan empat metode, yaitu Magnifikasi Momen, Amplifikasi Momen, Iterasi, dan Geometric Stiffness. Terlihat bahwa nilai  $\Delta$  meningkat secara eksponensial seiring bertambahnya kelangsingan kolom. Metode Geometric Stiffness menghasilkan nilai deformasi terbesar, sedangkan Amplifikasi Momen cenderung memberikan hasil yang lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa kekakuan lateral kolom menurun secara signifikan pada  $klu/r$  di atas 40, menandakan pentingnya mempertimbangkan efek  $P-\Delta$  pada desain kolom ramping.

Fenomena tersebut juga berdampak pada penurunan kapasitas nominal kolom. Ketika kelangsingan meningkat,

kapasitas momen nominal ( $M_n$ ) dan gaya tekan ultimit ( $P_n$ ) mengalami penurunan yang signifikan karena sebagian besar energi struktur terserap oleh deformasi elastis dan efek *second-order*.



Gambar 3. Pengaruh Rasio Kelangsingan terhadap Kapasitas Momen Nominal ( $M_n$ )

Gambar 3 memperlihatkan pengaruh rasio kelangsingan ( $klu/r$ ) terhadap kapasitas momen nominal ( $M_n$ ) kolom. Secara umum, kapasitas momen mengalami penurunan linier seiring bertambahnya kelangsingan. Pada  $klu/r = 20$ , kapasitas momen masih berada pada kisaran 125–130 kNm, namun menurun hingga sekitar 100 kNm saat  $klu/r$  mencapai 60. Metode *Geometric Stiffness* memberikan hasil kapasitas yang paling konservatif, sedangkan *Amplifikasi Momen* menghasilkan kapasitas tertinggi. Pola ini mengindikasikan bahwa efek kelangsingan tidak hanya mengurangi kekakuan, tetapi juga menurunkan kapasitas lentur efektif kolom akibat interaksi antara gaya aksial dan momen lentur.

#### Interpretasi terhadap Kinerja Struktur Tahan Gempa

Berdasarkan hasil analisis, kolom dengan rasio kelangsingan tinggi memiliki tingkat daktilitas yang lebih rendah dan lebih sensitif terhadap peningkatan gaya lateral. Dalam konteks desain bangunan tahan gempa, kondisi ini dapat menyebabkan ketidakseimbangan kekakuan antar tingkat yang berpotensi menimbulkan mekanisme keruntuhan kolom terlebih dahulu (*weak column–strong beam mechanism*).

Penelitian ini memperkuat temuan bahwa efek kelangsingan tidak boleh diabaikan pada perencanaan kolom beton bertulang, terutama pada bangunan bertingkat menengah hingga tinggi. Dengan mempertimbangkan pengaruh kelangsingan secara eksplisit, perencana dapat mengoptimalkan dimensi kolom dan rasio tulangan untuk mencapai keseimbangan antara kekakuan, daktilitas, dan efisiensi struktur. Berdasarkan hasil analisis, rekomendasi desain kolom terhadap variasi rasio kelangsingan dapat disarikan seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Rekomendasi Desain Kolom Berdasarkan Hasil Analisis

Rasio Kelangsingan ( $klu/r$ )	Kondisi Kolom	Rekomendasi Desain
< 25	Pendek	Pengaruh $P-\Delta$ dapat diabaikan
25 - 40	Sedang	Perlu pemeriksaan efek orde kedua
> 40	Ramping	Gunakan metode geometric stiffness, perbesar dimensi atau tulangan

#### Diskusi Kritis atas Perbandingan Metode dan Implikasi untuk Desain

Perbedaan hasil yang signifikan antara keempat metode analisis, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 2, memerlukan interpretasi kritis. Metode *Geometric Stiffness Matrix* secara konsisten menghasilkan nilai momen tertinggi dan deformasi lateral terbesar, sehingga paling konservatif. Hal ini dapat dijelaskan oleh kemampuannya

untuk secara eksplisit memodelkan penurunan kekakuan elemen (*softening*) akibat adanya gaya aksial, yang merupakan representasi langsung dari efek  $P-\Delta$  dalam formulasi matriks kekakuan struktur. Dengan kata lain, metode ini menangkap interaksi aksial-lentur ( $P-\delta$  effect) dan efek  $P-\Delta$  global dengan lebih utuh dibandingkan metode lainnya.

Sebaliknya, Metode Magnifikasi dan Amplifikasi Momen bergantung pada faktor magnifikasi yang diturunkan dari beban tekuk Euler dan merupakan penyederhanaan analisis orde kedua. Meskipun lebih sederhana untuk perhitungan manual, pendekatan ini cenderung kurang sensitif terhadap variasi konfigurasi struktur dan distribusi momen yang non-linier, sehingga menghasilkan estimasi yang kurang konservatif, terutama pada kolom yang sangat ramping.

Implikasi praktis dari temuan ini sangat penting bagi seorang insinyur desain:

1. Pemilihan Metode: Untuk struktur dengan kolom ramping ( $klu/r > 40$ ), ketergantungan hanya pada metode Magnifikasi Momen dari standar (seperti ACI 318-11) berisiko menghasilkan desain yang *non-conservative*. Analisis dengan *Geometric Stiffness Matrix* (biasanya tersedia dalam software elemen hingga seperti SAP2000 atau ETABS) seharusnya menjadi pilihan utama untuk memastikan keamanan.
2. Efisiensi Desain: Di sisi lain, untuk kolom pendek hingga sedang ( $klu/r < 40$ ), penggunaan metode yang lebih sederhana seperti Amplifikasi Momen masih dapat dipertimbangkan karena selisih hasilnya tidak terlalu besar, sehingga dapat menghemat waktu desain tanpa mengorbankan keamanan secara signifikan. Rekomendasi ini memperkuat dan memberikan nuansa yang lebih detail terhadap batasan yang diberikan dalam standar seperti SNI 2847:2019.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengonfirmasi fenomena penurunan kapasitas akibat kelangsingan, tetapi juga memberikan landasan rasional bagi praktisi dalam memilih tools analisis yang sesuai, yang pada akhirnya akan meningkatkan keandalan desain struktur tahan gempa.

#### 4. KESIMPULAN.

Berdasarkan hasil analisis pengaruh indeks kelangsingan terhadap perilaku kolom beton bertulang pada struktur portal bangunan tahan gempa, dapat disimpulkan hal-hal berikut:

- a. Indeks kelangsingan berpengaruh signifikan terhadap kapasitas dan stabilitas kolom beton bertulang. Semakin besar nilai kelangsingan, kolom semakin ramping dan mengalami peningkatan efek *second-order* ( $P-\Delta$ ) yang menyebabkan kenaikan momen lentur dan deformasi lateral.
- b. Peningkatan kelangsingan menyebabkan penurunan kapasitas nominal kolom. Nilai gaya aksial ultimit ( $P_n$ ) dan momen lentur nominal ( $M_n$ ) menurun seiring bertambahnya rasio kelangsingan akibat menurunnya kekakuan struktural.
- c. Metode *Geometric Stiffness Matrix* memberikan hasil yang paling konservatif dibandingkan metode Magnifikasi Momen, Amplifikasi Momen, dan Iterasi. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan kekakuan geometrik mampu menggambarkan pengaruh instabilitas kolom secara lebih akurat.
- d. Dalam perencanaan bangunan tahan gempa, pengaruh kelangsingan harus diperhitungkan untuk menjamin kekakuan dan daktilitas struktur. Pengabaian efek kelangsingan dapat menyebabkan simpangan antar tingkat yang berlebihan dan mengurangi kapasitas struktur dalam menahan beban lateral gempa.
- e. Kontribusi praktis dan novelty penelitian ini terletak pada analisis komparatif sistematis yang menghasilkan rekomendasi pemilihan metode analisis berdasarkan tingkat kelangsingan kolom. Hasilnya menunjukkan bahwa untuk desain yang aman, terutama pada kolom ramping ( $klu/r > 40$ ), penggunaan metode *Geometric Stiffness Matrix* sangat disarankan karena kemampuannya yang lebih baik dalam menangkap efek instabilitas geometrik secara numerik. Penelitian ini tidak hanya mengonfirmasi teori yang ada, tetapi juga memberikan panduan operasional yang jelas bagi insinyur praktisi dalam menangani efek kelangsingan, sekaligus menyoroti pentingnya pendekatan analisis yang lebih rigor di luar metode faktor magnifikasi sederhana yang diamanatkan oleh beberapa kode standar.

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam perancangan kolom beton bertulang yang lebih aman dan efisien, serta mendorong pengembangan studi lanjutan mengenai pengaruh kelangsingan terhadap perilaku nonlinier struktur beton pada kondisi gempa kuat.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Abdelazim, W., Mohamed, H. M., & Benmokrane, B. (2020). Inelastic second-order analysis for slender GFRP-reinforced concrete columns: Experimental investigations and theoretical study. *Journal of Composites for Construction*, 24(3), 04020016.
- Arfiadi, Y., & Hadi, M. N. S. (2006). Continuous bounded controllers for active control of structures.

- Computers & Structures*, 84(12), 798–807.
- Asimakopoulous, A. V, Karabalis, D. L., & Beskos, D. E. (2007). Inclusion of P- $\Delta$  effect in displacement-based seismic design of steel moment resisting frames. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(14), 2171–2188.
- Dewobroto, W. (2005). Aplikasi Rekayasa Konstruksi dengan Visual Basic 6.0. *Jakarta: PT Elex Media Komputindo*.
- Domizio, M., Ambrosini, D., & Curadelli, O. (2015). Experimental and numerical analysis of the collapse of a framed structure subjected to seismic loading. *Engineering Structures*, 82, 22–32.
- 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.
- Jose, C. (2024). The Structural design of the ESG-Baguaia school building uses the cross method for portal and the forced method for truss. *Proceedings of International Conference on Multidisciplinary Engineering (ICOMDEN)*, 2, 90.
- Moehle, J. P. (2019). Key changes in the 2019 edition of the ACI Building Code (ACI 318-19). *Concrete International*, 41(8), 21–27.
- Sarraf, M., & Bruneau, M. (1998). Ductile seismic retrofit of steel deck-truss bridges. II: Design applications. *Journal of Structural Engineering*, 124(11), 1263–1271.
- Ye, J.-B., Cai, J., Chen, Q.-J., Liu, X., Tang, X.-L., & Zuo, Z.-L. (2020). Experimental investigation of slender RC columns under horizontal static and impact loads. *Structures*, 24, 499–513.