

Evaluasi Konfigurasi Perkuatan Kolom Baja pada Bangunan Tingkat Rendah

Baskoro Abdi Praja ^{1*}

¹ Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Sleman, Indonesia

Article Info

Article history:

Received November 28, 2025

Revised Desember 2, 2025

Accepted Desember 12, 2025

Keywords:

kolom baja

perkuatan

displacement

efektifitas

gempa

ABSTRAK

Perubahan fungsi bangunan tingkat rendah dari hunian menjadi gedung perkantoran umumnya diikuti oleh peningkatan beban dan tuntutan kinerja struktur, khususnya terhadap beban gempa, sehingga perkuatan kolom baja diperlukan untuk menjaga kinerja layanan dan keselamatan struktur. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas konfigurasi perkuatan kolom baja pada bangunan baja 4 lantai dengan sistem rangka pemikul momen khusus yang mengalami perubahan fungsi menjadi perkantoran. Analisis dilakukan secara dinamik linier menggunakan data gempa wilayah Jakarta. Empat variasi konfigurasi perkuatan kolom (VAR1–VAR4) dibandingkan terhadap kondisi tanpa perkuatan (VAR0), dengan parameter evaluasi berupa *story displacement* maksimum pada arah X dan arah Y. Hasil menunjukkan bahwa respons simpangan meningkat seiring bertambahnya ketinggian bangunan pada seluruh variasi. Pada arah X, konfigurasi VAR2 memberikan kinerja paling efektif dan konsisten dengan reduksi *story displacement* maksimum sebesar 23–57% dibandingkan VAR0, sedangkan pada arah Y konfigurasi VAR1 menghasilkan reduksi terbesar sebesar 54–71% dan diikuti oleh VAR4. Perbedaan konfigurasi paling efektif pada masing-masing arah mengindikasikan bahwa respons struktur bersifat arah-spesifik akibat perbedaan distribusi kekakuan lateral. Dengan mempertimbangkan kinerja keseluruhan dan konsistensi pengurangan simpangan, konfigurasi VAR2 direkomendasikan sebagai solusi perkuatan kolom yang paling rasional untuk bangunan yang dianalisis.

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Corresponding Author:

Baskoro Abdi Praja,

Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari no.44, Sleman, 55281, Indonesia

Email: baskoro.praja@uajy.ac.id

1. PENDAHULUAN

Pada bangunan tingkat rendah ($\pm 1\text{--}4$ lantai), kebutuhan perkuatan kolom baja cukup sering muncul akibat perubahan fungsi bangunan atau rencana penambahan lantai yang meningkatkan tuntutan beban gravitasi dan beban gempa pada sistem struktur. Pada kondisi eksisting, keterbatasan ruang kerja, kebutuhan menjaga operasional bangunan, serta pertimbangan biaya-waktu pelaksanaan menuntut solusi perkuatan yang efektif namun tetap praktis untuk diterapkan di lapangan. Dalam konteks tersebut, penelitian ini memfokuskan evaluasi pada konfigurasi perkuatan kolom baja sebagai upaya peningkatan kinerja struktur pada bangunan tingkat rendah, dengan pendekatan komparatif terhadap beberapa alternatif perkuatan. Secara metodologis, studi dilakukan dengan membandingkan 4 tipe perkuatan kolom; analisis struktur dilakukan secara linier dinamik menggunakan data gempa wilayah Jakarta; dan efektivitas perkuatan dinilai dari simpangan maksimum (*maximum displacement*) yang terjadi relatif terhadap profil kolom tanpa perkuatan.

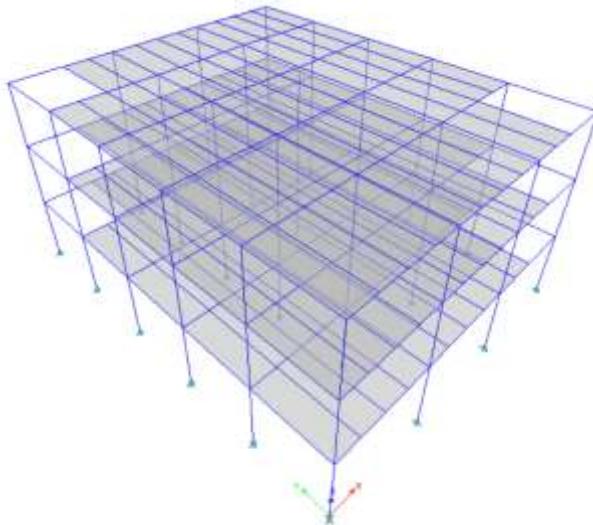
Kajian terdahulu menunjukkan bahwa perkuatan baja dapat dilakukan melalui strategi yang menambah/meningkatkan kontribusi elemen tambahan pada elemen struktur, misalnya perkuatan komponen yang dipasang-baut pada kondisi *preload* dengan model analitis untuk memprediksi kapasitas kolom secara cukup akurat[1]. Tinjauan yang lebih luas juga menegaskan bahwa penambahan pelat atau metode pengisian/pembungkus (contoh : *concrete encasement*) maupun pemanfaatan FRP merupakan teknik rehabilitasi yang lazim untuk meningkatkan performa elemen struktur baja (kekakuan, kapasitas, dan daktilitas)

pada bangunan baru maupun eksisting[2]. Pada level pemodelan komponen, studi lain membangun satu model kolom dengan penampang boks tanpa perkuatan dan empat varian perkuatan dengan parameter koneksi dan batas yang dipertahankan agar perbandingan antar-konfigurasi lebih konsisten[3]. Dalam konteks analisis struktur bangunan, penelitian berbasis perangkat lunak elemen hingga juga melaporkan bahwa penambahan pelat pada kolom baja dapat meningkatkan kekakuan dan memperbaiki respons simpangan/*drift* akibat beban gempa[4]. Namun demikian, kebutuhan studi yang secara khusus membandingkan beberapa konfigurasi perkuatan kolom dalam satu kerangka evaluasi bangunan tingkat rendah dengan input gempa lokal yang seragam masih relevan untuk melengkapi penerapan perkuatan pada kasus perubahan fungsi/penambahan lantai.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan gedung bertingkat 4 lantai yang dimaksudkan mengalami perubahan fungsi dari tempat tinggal/penginapan menjadi gedung untuk kegiatan perkantoran. Perubahan fungsi ini relevan secara struktural karena kategori beban hidup meningkat (aktivitas, kepadatan penghuni, serta pemakaian ruang yang lebih intensif), sehingga tuntutan kinerja struktur perlu dievaluasi kembali, terutama terhadap beban gempa. Dalam penelitian ini, fokus evaluasi diarahkan pada perilaku simpangan bangunan akibat beban gempa pada arah utama X dan Y, serta bagaimana simpangan tersebut berubah ketika kolom diperkuat dengan beberapa konfigurasi.

Data teknis untuk pemodelan struktur adalah sebagai berikut : material mutu baja menggunakan SS400 (f_y 245 Mpa, f_u 400 Mpa). Bangunan yang dianalisis merupakan struktur baja 4 lantai dengan sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) seperti pada Gambar 1.



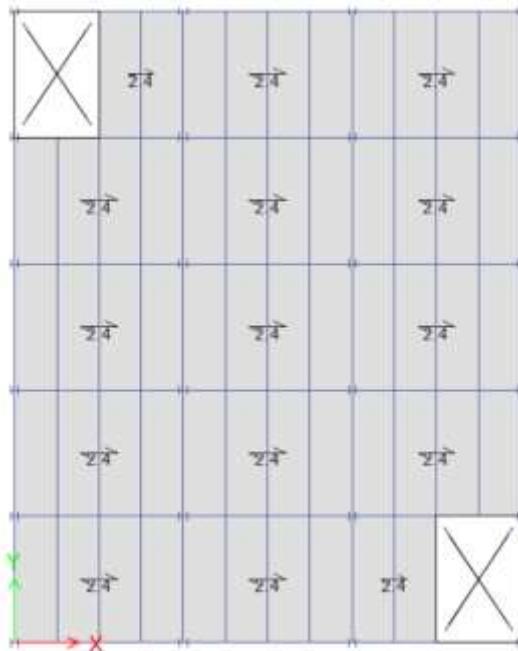
Gambar 1. Pemodelan Struktur Gedung.

Elemen utama dimodelkan sebagai berikut: kolom utama menggunakan profil H 350, balok utama menggunakan profil IWF 500.200, dan balok sekunder menggunakan profil IWF 300.150 seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Denah Struktur Tipikal Lantai 2-4.

Pembebanan gravitasi yang digunakan terdiri dari beban mati tambahan (*superimposed dead load/ SIDL*) sebesar 1,5 kN/m² dan beban hidup (*live load/ LL*) sebesar 2,4 kN/m² untuk fungsi perkantoran mengacu pada ketentuan pembebanan SNI 1727:2020 seperti pada Gambar 3[5]. Beban gravitasi ini digunakan untuk membentuk massa seismik dan kondisi kerja struktur sebelum diberi input gempa (sesuai ketentuan analisis dinamik linier yang diterapkan pada perangkat lunak analisis struktur).

Gambar 3. Penerapan *Live Load* dalam kN/m².

Untuk pembebanan gempa menggunakan kota Jakarta (kelas situs Tanah Sedang) dengan mempertimbangkan lokasi tersebut sangat dinamis untuk keperluan bisnis. Adapun data gempa yang digunakan berdasarkan rsa.ciptakarya.pu.go.id adalah sebagai berikut.

Spektral Percepatan Periode Pendek	S_s	= 0.8368 g
Spektral Percepatan Periode 1 Detik	S_1	= 0.3942 g
Koefisien Situs	F_a	= 1.1653
Koefisien Situs	F_y	= 1.9058

$$\begin{array}{ll} \text{Percepatan Desain Periode Pendek} & S_{DS} = 0.6501 \\ \text{Percepatan Desain Periode 1 Detik} & S_{D1} = 0.5008 \end{array}$$

Analisis dilakukan secara dinamik linier. Evaluasi dilakukan untuk dua arah pembebanan gempa, yaitu arah X dan arah Y, sehingga dapat terlihat konsistensi efektivitas perkuatan terhadap respons lateral pada kedua sumbu utama bangunan.

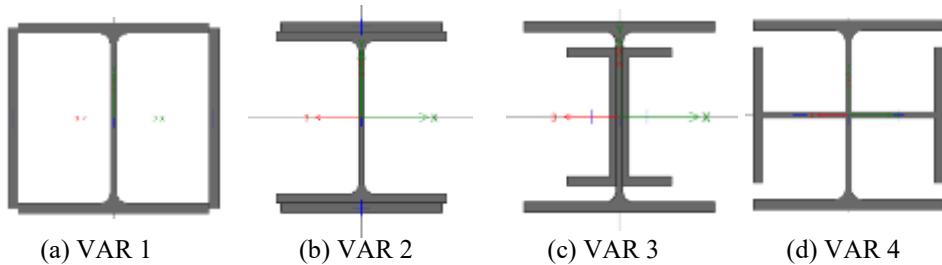
Penelitian menerapkan empat konfigurasi perkuatan kolom (VAR1–VAR4) dan membandingkannya terhadap kondisi acuan tanpa perkuatan (VAR0). VAR0 didefinisikan sebagai profil kolom eksisting tanpa modifikasi. VAR1 sampai VAR4 didefinisikan sebagai empat detail perkuatan kolom yang berbeda (geometri/ketebalan elemen tambahan dan detail pemasangannya mengikuti rancangan variasi masing-masing), yang diterapkan pada elemen kolom utama tanpa mengubah elemen balok utama maupun balok sekunder. Perkuatan yang diterapkan terdiri dari 4 variasi :

Variasi 1 yakni penambahan pelat setebal 19 mm yang mengikuti tebal *flange* dari kolom utama H 350. Penambahan pelat tersebut diletakan pada sisi kanan dan kiri bagian web sehingga menjadi cover plate penampang seperti pada Gambar 4a.

Variasi 2 yakni penambahan pelat pada bagian *flange* atas dan *flange* bawah setebal 19 mm mengikuti tebal *flange* dari kolom utama H 350 seperti pada Gambar 4b.

Variasi 3 yakni penambahan profil CNP 250 pada bagian web dari kolom utama H 350. Pertimbangan penggunaan CNP 250 adalah penyesuaian ruang bebas pada web dan pertimbangan untuk menebalkan *web* dan *flange* kolom utama seperti pada Gambar 4c.

Variasi 4 yakni penambahan profil Tee 250 yang dipasangkan pada bagian web sehingga menyerupai profil penampang King Cross seperti pada Gambar 4d.



Gambar 4. Variasi Perkuatan.

Efektivitas perkuatan dinilai berdasarkan simpangan maksimum struktur akibat beban gempa pada arah X dan Y. Untuk menjaga konsistensi komparasi, hasil setiap variasi (VAR1–VAR4) dibandingkan terhadap simpangan maksimum pada VAR0 (tanpa perkuatan) sebagai *baseline*. Dengan demikian, konfigurasi perkuatan dianggap lebih efektif apabila menghasilkan simpangan maksimum yang lebih kecil dibanding VAR0 (atau rasio simpangan VARi/VAR0 yang lebih rendah) pada kedua arah pembebanan.

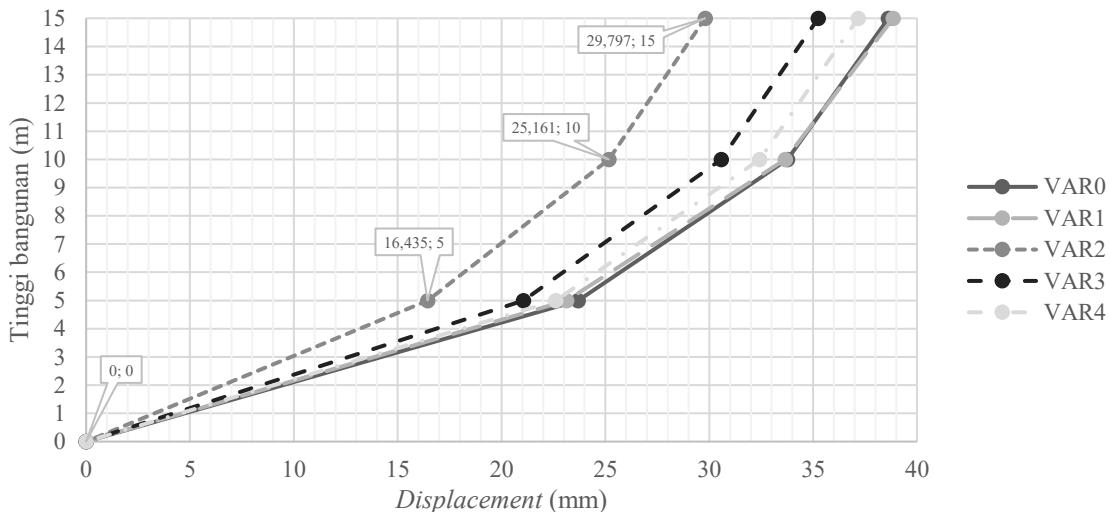
Tahap awal dilakukan pemodelan struktur eksisting (VAR0) sesuai konfigurasi bangunan 4 lantai SRPMK, properti material SS400, dimensi profil, serta pembebanan gravitasi. Selanjutnya, model dimodifikasi menjadi VAR1–VAR4 dengan menerapkan konfigurasi perkuatan kolom yang telah ditetapkan, kemudian seluruh variasi dianalisis menggunakan analisis dinamik linier dengan input gempa Jakarta. Output utama yang diekstraksi adalah simpangan maksimum arah X dan Y untuk masing-masing variasi. Tahap akhir penelitian adalah menyusun rekomendasi konfigurasi perkuatan berdasarkan kinerja paling efektif (simpangan maksimum paling kecil relatif terhadap VAR0) sebagai dasar pengambilan keputusan perkuatan pada kasus perubahan fungsi menjadi perkantoran.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil analisis dinamik linier pada bangunan baja 4 lantai dengan sistem rangka pemikul momen khusus yang dimodelkan dalam lima variasi, yaitu kondisi tanpa perkuatan (VAR0) dan empat konfigurasi perkuatan kolom (VAR1–VAR4). Hasil utama yang dibahas berfokus pada respons simpangan (displacement) struktur akibat input gempa kota Jakarta pada dua arah ortogonal (X dan Y), sebagai indikator langsung untuk menilai perubahan kinerja lateral bangunan setelah perkuatan diterapkan. Pembahasan dilakukan secara komparatif dengan menjadikan VAR0 sebagai acuan, sehingga efektivitas tiap konfigurasi perkuatan dapat dinilai berdasarkan kemampuan menurunkan simpangan maksimum, konsistensi kinerja pada kedua arah pembebanan, serta implikasinya terhadap rekomendasi konfigurasi perkuatan yang paling tepat untuk kasus perubahan fungsi bangunan menjadi perkantoran.

3.1. Maksimum Story Displacement arah X

Pada bagian ini, hasil maksimum *story displacement* arah X disajikan untuk memperlihatkan distribusi simpangan lateral pada setiap lantai, sekaligus membandingkan respons struktur antara kondisi tanpa perkuatan (VAR0) dan variasi perkuatan (VAR1–VAR4). Penyajian dalam bentuk kurva displacement–ketinggian bangunan digunakan untuk mengidentifikasi kecenderungan peningkatan simpangan terhadap elevasi, serta menilai perbedaan kinerja masing-masing konfigurasi perkuatan secara komparatif pada level lantai. Ringkasan hasil tersebut ditunjukkan pada Gambar 5, yang selanjutnya dijadikan rujukan utama dalam pembahasan mengenai efektivitas perkuatan kolom dalam mengendalikan simpangan maksimum akibat beban gempa pada arah X.



Gambar 5. Grafik *story displacement* arah X terhadap variasi perkuatan kolom.

Berdasarkan **Gambar 5** dan data nilai *displacement* pada **Tabel 1**, terlihat bahwa maksimum *story displacement* arah X meningkat seiring bertambahnya elevasi bangunan pada seluruh variasi model. Pada kondisi tanpa perkuatan (VAR0), displacement tercatat sebesar **23.687 mm** pada elevasi 5 m, meningkat menjadi **33.756 mm** pada elevasi 10 m, dan mencapai nilai maksimum **38.624 mm** pada elevasi puncak 15 m. Penerapan perkuatan kolom menunjukkan pengaruh yang berbeda terhadap respons tersebut. VAR2 menghasilkan penurunan displacement paling signifikan dan konsisten di seluruh elevasi, dengan nilai **16.435 mm**, **25.161 mm**, dan **29.797 mm** pada masing-masing elevasi, sedangkan VAR3 dan VAR4 menunjukkan penurunan yang lebih terbatas. VAR1 memberikan perubahan yang relatif kecil dan pada elevasi puncak menghasilkan displacement yang hampir sama dengan kondisi tanpa perkuatan, sehingga efektivitasnya dalam mengendalikan simpangan lateral arah X tergolong rendah.

Tabel 1. Nilai *Displacement* arah X pada masing-masing variasi perkuatan.

Tinggi (m)	X0 (mm)	X1 (mm)	X2 (mm)	X3 (mm)	X4 (mm)
15	38.624	38.847	29.797	35.245	37.164
10	33.756	33.658	25.161	30.567	32.416
5	23.687	23.136	16.435	21.055	22.613
0	0	0	0	0	0

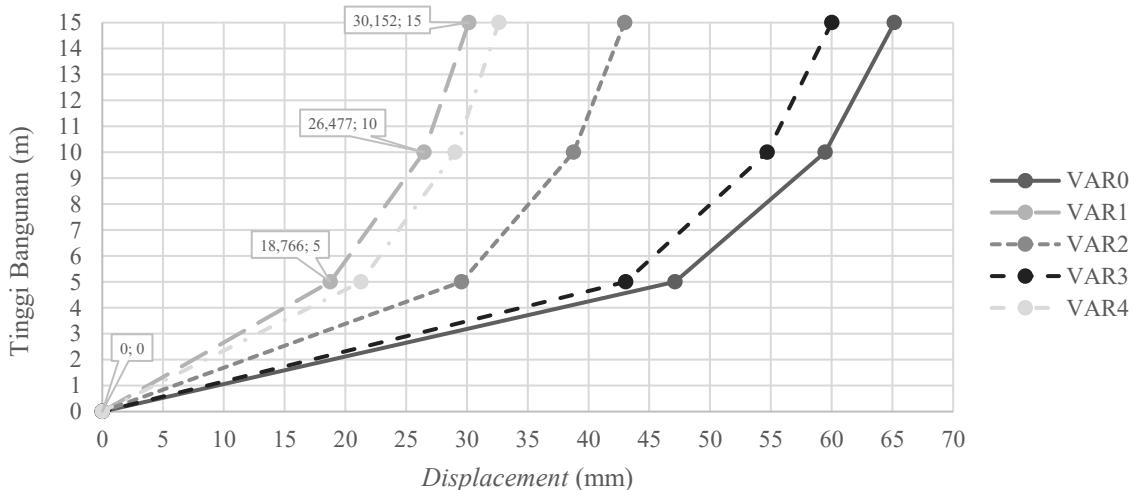
Tingkat efektivitas masing-masing konfigurasi perkuatan ditunjukkan lebih jelas melalui **Tabel 2**, yang menyajikan signifikansi penurunan displacement relatif terhadap VAR0. VAR2 secara konsisten memberikan tingkat perbaikan tertinggi, yaitu sebesar **57%** pada elevasi 5 m, **35%** pada elevasi 10 m, dan **23%** pada elevasi 15 m. Sebaliknya, VAR3 dan VAR4 hanya menunjukkan perbaikan menengah hingga rendah, sedangkan VAR1 menunjukkan signifikansi yang tidak stabil dan relatif kecil, khususnya pada lantai atas. Pola ini mengindikasikan bahwa efektivitas perkuatan kolom dominan terjadi pada lantai bawah dan menengah, serta bahwa konfigurasi VAR2 mampu meningkatkan kekakuan lateral struktur secara lebih merata sepanjang tinggi bangunan. Dengan demikian, baik hasil grafik maupun evaluasi kuantitatif pada Tabel 1 dan Tabel 2 secara konsisten menunjukkan bahwa VAR2 merupakan konfigurasi perkuatan yang paling efektif dalam mengendalikan *story displacement* arah X.

Tabel 2. Efektifitas variasi perkuatan arah X.

Tinggi (m)	X1 (mm)	X2 (mm)	X3 (mm)	X4 (mm)
15	-1%	23%	9%	4%
10	13%	35%	21%	16%
5	40%	57%	45%	41%

3.2. Maksimum Story Displacement arah Y

Hasil maksimum *story displacement* arah Y untuk seluruh variasi model disajikan pada **Gambar 6** dan diringkas pada **Tabel 3**. Serupa dengan respons arah X, simpangan lateral arah Y menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya elevasi bangunan, dengan nilai maksimum terjadi pada lantai teratas ($L = 15$ m). Pada kondisi tanpa perkuatan (VAR0), displacement arah Y tercatat sebesar **47.125 mm** pada elevasi 5 m, meningkat menjadi **59.481 mm** pada elevasi 10 m, dan mencapai **65.170 mm** pada elevasi puncak. Nilai ini secara umum lebih besar dibandingkan arah X, yang mengindikasikan bahwa struktur memiliki kekakuan lateral yang lebih rendah pada arah Y. Penerapan perkuatan kolom memberikan pengaruh yang berbeda-beda terhadap respons tersebut. VAR1 dan VAR4 menunjukkan penurunan displacement yang cukup signifikan dibandingkan VAR0, sementara VAR2 dan VAR3 masih memperlihatkan nilai displacement yang relatif besar, khususnya pada lantai atas.

Gambar 5. Grafik *story displacement* arah Y terhadap variasi perkuatan kolom.Tabel 3. Nilai *Displacement* arah Y pada masing-masing variasi perkuatan.

Tinggi (m)	Y0 (mm)	Y1 (mm)	Y2 (mm)	Y3 (mm)	Y4 (mm)
15	65.17	30.152	42.979	60.019	32.63
10	59.481	26.477	38.777	54.711	29.041
5	47.125	18.766	29.545	43.056	21.297
0	0	0	0	0	0

Evaluasi kuantitatif terhadap tingkat efektivitas perkuatan ditunjukkan pada **Tabel 4**, yang menyajikan signifikansi penurunan displacement relatif terhadap VAR0. VAR1 memberikan perbaikan paling konsisten dan dominan, dengan reduksi displacement sebesar **71%** pada elevasi 5 m, **59%** pada elevasi 10 m, dan **54%** pada elevasi 15 m. VAR4 juga menunjukkan kinerja yang baik dengan tingkat perbaikan sebesar **67%, 55%,** dan **50%** pada elevasi yang sama. Sebaliknya, VAR2 dan VAR3 hanya memberikan penurunan displacement yang terbatas, terutama pada lantai atas, dengan signifikansi yang relatif kecil. Pola ini menunjukkan bahwa efektivitas perkuatan kolom pada arah Y sangat dipengaruhi oleh konfigurasi perkuatan dan distribusi kekakuan yang dihasilkan, serta menegaskan adanya perbedaan respons struktur antara arah X

dan arah Y. Temuan ini menjadi dasar penting dalam pembahasan lanjutan untuk menentukan konfigurasi perkuatan yang paling optimal secara keseluruhan, dengan mempertimbangkan kinerja dua arah utama bangunan.

Tabel 4. Efektifitas variasi perkuatan arah Y.

Tinggi (m)	Y1 (mm)	Y2 (mm)	Y3 (mm)	Y4 (mm)
15	54%	34%	8%	50%
10	59%	40%	16%	55%
5	71%	55%	34%	67%
0	0	0	0	0

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dinamik linier pada bangunan baja 4 lantai dengan sistem rangka pemikul momen khusus yang mengalami perubahan fungsi menjadi gedung perkantoran, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Perubahan fungsi bangunan dari hunian menjadi perkantoran meningkatkan tuntutan kinerja struktur terhadap beban gempa, yang tercermin dari besarnya *story displacement* pada kondisi tanpa perkuatan (VAR0), terutama pada lantai atas. Hasil analisis menunjukkan bahwa respons simpangan lateral meningkat seiring bertambahnya ketinggian bangunan, baik pada arah X maupun arah Y, dengan nilai maksimum terjadi pada lantai teratas.
2. Penerapan perkuatan kolom memberikan pengaruh yang signifikan terhadap pengendalian *story displacement*, namun tingkat efektivitasnya sangat dipengaruhi oleh konfigurasi perkuatan dan arah pembebanan gempa. Pada arah X, konfigurasi perkuatan VAR2 menunjukkan kinerja paling efektif dan konsisten, dengan reduksi *displacement* maksimum sebesar 23–57% dibandingkan kondisi tanpa perkuatan (VAR0) pada seluruh elevasi bangunan.
3. Pada arah Y, konfigurasi perkuatan yang paling efektif berbeda dengan arah X. VAR1 menunjukkan tingkat reduksi displacement terbesar, yaitu sebesar 54–71% dibandingkan VAR0, diikuti oleh VAR4 dengan tingkat perbaikan yang relatif tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa struktur memiliki kekakuan lateral yang tidak seragam pada kedua arah utama, sehingga respons dan efektivitas perkuatan bersifat arah-spesifik.
4. Perbedaan konfigurasi perkuatan terbaik pada arah X dan arah Y menunjukkan bahwa mekanisme kerja perkuatan kolom sangat dipengaruhi oleh orientasi struktur, distribusi kekakuan rangka, dan arah dominan respons gempa. Dengan mempertimbangkan kinerja keseluruhan, konsistensi pengurangan simpangan, serta dominasi efektivitas pada arah X, konfigurasi perkuatan VAR2 direkomendasikan sebagai solusi perkuatan yang paling rasional untuk bangunan yang dianalisis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Wang, Q. Su, X. Jiang, and E. Ghafoori, “Stability of steel columns with bolted strengthening under preload: An analytical model,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 201, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.jcsr.2022.107699.
- [2] K. D. Tsavdaridis, “Strengthening Techniques: Code-Deficient Steel Buildings,” in *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 1–26. doi: 10.1007/978-3-642-36197-5_207-1.
- [3] J. Szafran, P. Świątkiewicz, and P. Kaszubska, “On Numerical and Analytical Investigation of the Effectiveness of Strengthening of Steel Columns—Case Study,” *Materials*, vol. 18, no. 24, Dec. 2025, doi: 10.3390/ma18245667.
- [4] M. Hbeam, N. P. Silvi, and I. P. Laintarawan, “Jurnal Ilmiah Rekayasa Sipil Analisis dan Perkuatan Kolom Baja Struktural Akibat Beban Gempa,” vol. 20, no. 1, 2023, [Online]. Available: <http://ejournal2.pnp.ac.id/index.php/jirs/TerakreditasiSINTAPeringkat5>
- [5] Badan Standarisasi Nasional, “Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain,” 2020.
- [6] Pratama, C., Sulistiyanto, S., & Ximenes, J. (2025). Pemanfaatan Rompi Untuk Alat Pendekripsi Detak Jantung Dan Suhu Tubuh Berbasis Esp32 Di Puskesmas Pembantu Desa Sentul. *Akiratech*, 2(3), 127-135.

- [7] Moharram, N. A., Bayoumi, S., Hanafy, A. A., & El-Maghlany, W. M. (2021). Techno-economic analysis of a combined concentrated solar power and water desalination plant. *Energy Conversion and Management*, 228, 113629.
- [8] Sulistiyanto, S., Imaduddin, I., Nadhiroh, A. Y., Widoretno, S., Fahmi, M. H., Mukhlison, M., ... & Pawening, R. E. (2025). IoT-based model for real-time monitoring of new and renewable energy systems. *EUREKA: Physics and Engineering*, (3), 36-48.
- [9] J. L. Ricles, R. Sause, and S. Peng, "Seismic performance of steel column base connections in low-rise buildings," *Journal of Structural Engineering*, vol. 128, no. 2, pp. 148–158, Feb. 2002, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:2(148).
- [10] H. D. Rosowsky and J. R. Chambers, "Evaluation of steel column strengthening techniques for existing structures," *Engineering Structures*, vol. 25, no. 6, pp. 803–812, Jun. 2003, doi: 10.1016/S0141-0296(03)00018-7.
- [11] Y. J. Kim and H. S. Kim, "Seismic retrofit of steel columns using steel jacketing method," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 65, no. 3, pp. 552–562, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.jcsr.2008.09.004.
- [12] M. D'Aniello, G. La Manna Ambrosino, and F. Portoli, "Experimental and numerical investigation on steel column base connections for low-rise buildings," *Journal of Building Engineering*, vol. 32, pp. 101516, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jobe.2020.101516.
- [13] A. Di Sarno and G. Manfredi, "Seismic upgrading of existing steel structures: State of the art and future trends," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 6, no. 1–2, pp. 17–30, Feb. 2010, doi: 10.1080/15732470802663774.
- [14] S. K. Ghosh and S. Fanella, "Behavior and design of steel columns in low-rise structural systems," *Structures*, vol. 14, pp. 204–213, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.istruc.2018.05.003.