Jurnal TEKNIK SIPIL

Jurnal Teknik Sipil, 19(1), Oktober 2026: 1 – 13
DOI: 10.24002/jts.v19i1.14717
Available Online at: https://ojs.uajy.ac.id/index.php/jts/issue/archive

PENGARUH KONFIGURASI DINDING GESER BANGUNAN BERKANTILEVER TERHADAP KOMBINASI GEMPA HORIZONTAL DAN VERTIKAL

Kezia Audrey Tejohutomo[1*], Alfred Jonathan Susilo[1]
[1]Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tarumanagara
Jl. Letjen. S. Parman No.1, Jakarta Barat 11440
[*]Corresponding authors: keziaaudrey.tejohutomo@gmail.com

Abstract: Vertical seismic is one of the seismic loading components that is often simplified in building design. In cantilever buildings, vertical ground motion can significantly increase the dynamic structural response, particularly in cantilever beams and lateral force-resisting systems. This study aims to investigate the influence of shear wall configuration on the structural response of cantilever buildings subjected to combined horizontal and vertical earthquake loading. The structural model consists of an eight-story hotel building with a cantilever, incorporating four different shear wall configurations, namely planar and L-shaped shear walls. Linear dynamic analysis was performed using the response spectrum method with loading combinations based on SNI 1726:2019, supplemented by a vertical earthquake load factor. The evaluated parameters include the natural period, base shear, roof displacement, inter-story drift, structural irregularity, and internal forces of structural members. The results indicate that the L-shaped shear wall configuration effectively reduces moment amplification caused by vertical earthquake effects while significantly improving the lateral stiffness of the structure, as evidenced by a reduction in the natural period of up to 47.5% and a decrease in roof displacement of up to 0.04 m. Furthermore, the lateral force distribution becomes more concentrated in the shear walls, resulting in lower internal forces in columns and primary beams. In the cantilever element, the L-shaped shear wall also reduces moment amplification due to vertical earthquake loading, leading to a more stable and controlled structural response.

Keywords: shear wall, cantilevered building, vertical earthquake, response spectrum, lateral stiffness

Abstrak: Gempa vertikal merupakan salah satu aspek pembebanan pada perencanaan bangunan gedung yang seringkali disederhanakan. Pengaruh gempa vertikal pada bangunan berkantilever dapat meningkatkan respons dinamik struktur secara signifikan, terutama pada elemen balok kantilever dan sistem penahan lateral. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh konfigurasi dinding geser terhadap respons struktur bangunan berkantilever akibat kombinasi gempa vertikal dan horizontal. Model struktur yang digunakan berupa gedung hotel berkantilever dengan empat variasi konfigurasi dinding geser berbeda (*planar* dan *L-shaped shear wall*) dengan metode analisis dinamik linier metode respons spektrum menggunakan variasi pembebanan berdasarkan SNI 1726:2019 dan ditambah dengan faktor gempa vertikal. Parameter yang dianalisis meliputi periode getar, gaya geser dasar, simpangan atap, simpangan antar tingkat, ketidakberaturan struktur, dan gaya dalam elemen struktur. Berdasarkan hasil penelitian, konfigurasi L-shaped shear wall mampu mengurangi amplifikasi momen akibat pengaruh gempa vertikal, meningkatkan kekakuan lateral struktur secara signifikan dengan penurunan periode getar hingga 47,5% dan penurunan simpangan atap hingga 0,04 meter. Selain itu, distribusi gaya lateral menjadi lebih terpusat pada dinding geser sehingga gaya dalam pada kolom dan balok induk menurun. Pada elemen kantilever, penggunaan *L-shaped shear wall* mampu mengurangi amplifikasi momen akibat pengaruh gempa vertikal sehingga respons struktur menjadi lebih stabil dan terkendali.

Kata kunci: dinding geser, bangunan berkantilever, gempa vertikal, respons spektrum, kekakuan lateral

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dengan aktivitas seismik yang tinggi, bahkan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) merillis pada tahun 2025 Indonesia mengalami 43.439 kali gempa bumi, 153 diantaranya lebih besar dari 5 magnitudo. Pada perencanaan struktur bangunan tahan gempa, faktor gempa dibedakan menjadi 2 berdasarkan arah geraknya, yaitu faktor gempa horizontal dan gempa vertikal. Dalam peraturan perancangan bangunan gedung, faktor gempa vertikal disimpllifikasi menjadi 0,2 S_{DS} dikalikan dengan beban mati. Namun

pendekatan statis tersebut belum mampu merepresentasikan sifat dinamik gempa vertikal yang memiliki frekuensi tinggi dan respons fluktuatif. Efektititas pendekatan tersebut sangat bergantung pada periode vertikal struktur (T_v). Selain itu, penggunakan parameter tersebut menghasilkan estimasi respons yang lebih rendah dibandingkan dengan pendekatan berbasis 0,3 S_{av}, sehingga berpotensi kurang konservatif terutama pada struktur periode menengah (Bolourani et al., 2025).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pengabaian gempa vertikal pada struktur tidak dapat diabaikan. Pengabaian gempa vertikal dapat meningkatkan tuntutan daktilitas hingga 50% dan gaya geser balok hingga 22%, serta memicu pembentukan sendi plastis di lokasi tak terduga dan mengubah mekanisme keruntuhan struktur (Manoukas, 2026). Penelitian lain menunjukkan bahwa komponen gempa vertikal terbukti mampu meningkakan gaya aksial kolom hingga 5–6 kali, mempengaruhi momen lentur sekitar 15–50%, dan meningkatkan simpangan lateral sebesar 25–35%, terutama pada gempa near-fault (Hasrouri et al., 2025). Kondisi ini menjadi lebih kritis pada bangunan berkantilever, karena elemen kantilever menjadi titik lemah yang dapat mengalami kegagalan lebih awal disbanding struktur tanpa kantilever (Maverick et al., 2025).

Salah satu sistem struktur yang efektif dalam meningkatkan ketahanan gempa adalah penggunaan dinding geser. Dinding geser mampu memberikan kekakuan lateral yang signifikan melalui mekanisme lentur dalam bidang yang lebih efisien dibandingkan struktur rangka murni pada gedung tinggi (Baig & Rashid, 2020). Selain itu, konfigurasi dinding geser sangat berpengaruh terhadap stabilitas struktur. Konfigurasi yang lebih simetris, seperti penempatan *L-shape shear wall* di sudut bangunan terbukti lebih optimal karena mampu mendistribusikan gaya secara lebih merata dan menurunkan nilai simpangan antar tingkat secara signifikan (Patria & Haq, 2024). Optimasi konfigurasi dinding geser menjadi sangat krusial pada bangunan berkantilever untuk meminimalkan respons dinamik dan distribusi kerusakan sistem sambungan balok-kolom yang sangat rentan terhadap kombinasi gaya gempa horizontal dan vertikal mendadak (Reddy et al., 2024).

Pada gedung tinggi dengan pemodelan 3D dan pembebanan gempa bidireksional, penggunaan dinding geser menunjukkan margin keamanan yang memadai terhadap faktor *overstrength* dan amplikasi defleksi, sehingga memungkinkan desain yang lebih ekonomis tanpa mengurangi tingkat keselamatan struktur (Hussain et al., 2024; Isık et al., 2020; Mwafy & Khalifa, 2017). Selain konfigurasi dinding geser, kekuatan material juga berpengaruh terhadap kapasitas struktur. Peningkatan mutu beton meningkatkan kekakuan struktur, sedangkan penggunaan baja tulangan berkekuatan tinggi mampu meningkatkan kapasitas geser dasar terhadap kombinasi beban gempa horizontal dan vertikal (Işık et al., 2021).

Pada konfigurasi *L-shaped shear wall*, efektifitas reduksi respons struktur tehadp gempa vertikal sangat dipengaruhi oleh integritas sambungan yang mumpuni (Lee & Kang, 2024). Selain itu, perubahan fungsi bangunan yang memicu ketidakberaturan massa, baik secara vertikal maupun horizontal yang secara signifikan meningkatkan kerentanan seismik struktur beton bertulang akibat adanya interaksi nonlinear antara respon torsi dan lateral saat terjadi gempa (Ghanem et al., 2024). Dalam analisis struktur dengan kombinasi gempa horizontal dan vertikal, akurasi pemodelan beban aksial juga menjadi faktor penting, terutama saat struktur mengalami simpangan yang besar (Xiao, 2019).

Penelitian lain membuktikan bahwa elemen kantilever memiliki kerentanan tinggi terhadap beban dinamik vertikal yang dapat memengaruhi distribusi respons struktur secara signifikan. Hal ini menunjukkan pentingnya evaluasi respons struktur pada bangunan berkantilever terhadap kombinasi gempa horizontal dan vertikal (Erdem & Gucuyen, 2025).

Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan pengaruh konfigurasi dinding geser pada bangunan berkantilever terhadap respons struktur akibat kombinasi gempa horizontal dan vertikal.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode analisis linier dengan analisis respons spektrum menggunakan perangkat lunak MidasGen untuk mengevaluasi respons struktur akibat kombinasi pembebanan gempa.

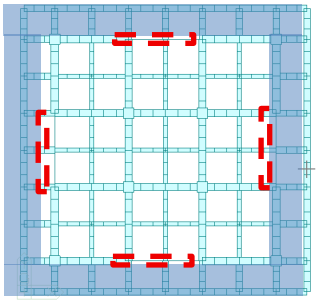
Denah pemodelan

Model yang digunakan dalam penelitian ini berupa gedung hotel 8 lantai dengan tinggi antar lantai sebesar 4 meter dengan bentang 18x18 meter yang memiliki kantilever selebar 2,5 meter pada keempat sisi bangunan. Variasi pemodelan

yang digunakan pada analisis ini dibagi menjadi 4, yaitu:

Model 1

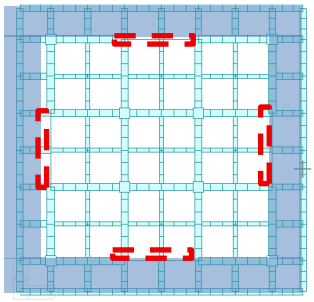
Model dengan dinding geser sepanjang 6 meter yang ditempatkan pada tengah bentang bangunan (*planar shear wall*) yang dianalisis dengan menggunakan pembebanan gempa horizontal berdasarkan metode analisis linier. Denah bangunan Model 1 disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Denah Model 1

Model 2

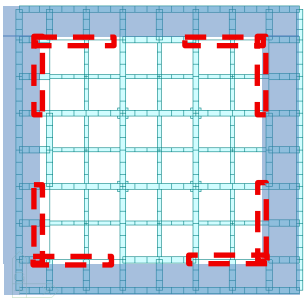
Model dengan dinding geser sepanjang 6 meter yang ditempatkan pada tengah bentang bangunan (*planar shear wall*) yang dianalisis dengan menggunakan pembebanan gempa horizontal dan gempa vertikal berdasarkan metode analisis linier.bDenah bangunan Model 2 disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Denah Model 2

Model 3

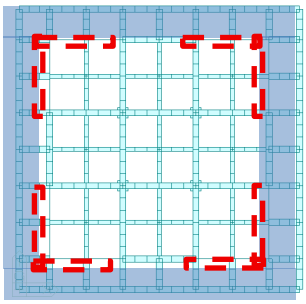
Model dengan dua dinding geser masing-masing sepanjang 6 meter yang ditempatkan pada keempat sudut bangunan (*L-shaped shear wall*) yang dianalisis dengan menggunakan pembebanan gempa horizontal berdasarkan metode analisis linier. Denah bangunan Model 3 disajikan pada Gambar 3.



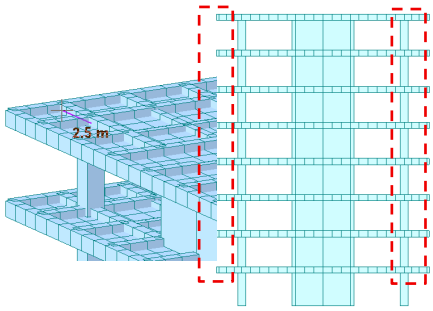
Gambar 3. Denah Model 3

Model 4

Model dengan dua dinding geser masing-masing sepanjang 6 meter yang ditempatkan pada keempat sudut bangunan (*L-shaped shear wall*) yang dianalisis dengan menggunakan pembebanan gempa horizontal dan gempa vertikal berdasarkan metode analisis linier. Denah bangunan Model 4 disajikan pada Gambar 4, sedangkan untuk tampak samping kantilever bangunan disajikan pada Gambar 5.



Gambar 4. Denah Model 4



Gambar 5. Denah Tampak Samping Kantilever

Pembebanan

Pembebanan pada pemodelan ini dibedakan menjadi jenis yaitu beban lantai, beban kantilever, dan beban atap.

Beban lantai

Beban lantai bekerja pada area kamar hotel yang berada pada bentang 18 × 18 m. Beban yang digunakan terdiri atas beban mati sebesar 3,1

kN/m² dan beban hidup untuk fungsi hotel sebesar 2,4 kN/m².

Beban kantilever

Beban kantilever bekerja pada area restoran yang berada pada bagian kantilever bangunan. Beban yang digunakan terdiri atas beban mati sebesar 1 kN/m^2 dan beban hidup untuk fungsi restoran sebesar 4,79 kN/m^2.

Beban atap

Beban atap didefinisikan sebagai dak yang berada pada atap bangunan. Beban atap didefinisikan dengan beban mati sebesar 1 kN/m^2 dan beban hidup sebesar 2 kN/m^2.

Properti material dan elemen struktur

Gedung hotel direncanakan menggunakan mutu beton setara f_c' 35 MPa dengan mutu tulangan F_y 420 MPa. Dimensi kolom yang digunakan sebesar 850 × 850 mm. Dimensi balok induk yang digunakan sebesar 500 × 700 mm. Dimensi balok anak yang digunakan sebesar 350 × 500 mm. Dimensi balok kantilever yang digunakan sebesar 500 × 700 mm.

Asumsi pemodelan

Batasan penelitian ini adalah dinding geser dimodelkan menggunakan momen inersia sebesar 0,70 I_g sesuai SNI 2847:2019 Tabel 6.6.3.1.1(a) yang merepresentasikan kondisi tidak retak (*uncracked*).

Kombinasi pembebanan

Kombinasi pemodelan yang digunakan diambil berdasarkan SNI 1727:2019 tentang Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain. Penentuan pembebanan dilakukan dengan mempertimbangkan faktor nilai redudansi (ρ) sebesar 1,3. Selain itu, analisis ini melibatkan kombisasi pembebanan dengan pengaruh beban seismik yang diatur dalam SNI 1727:2019 pasal 4.2.3.3.

Pembebanan yang dilakukan pada pemodelan dengan gempa horizontal sebagai berikut.

1. 1,4 D
2. 1,2 D + 0,6 L
3. 1,2 D + 1,0 L
4. 0,9 D
5. (1,2 + 0,2 S_{DS}) D + 1,0 L ± (E_x ± 0,3 E_y)
6. (1,2 + 0,2 S_{DS}) D + 1,0 L ± (E_y ± 0,3 E_x)
7. (0,9 – 0,2 S_{DS}) D ± (E_y ± 0,3 E_x)
8. 1.0 D ± 0.7 (E_x ± 0,3 E_y)
9. 1,0 D + 0,75 L ± 0,525 (E_x ± 0.3 E_y)
10. 0,6 D ± 0,7 (E_x ± 0,3 E_y)

Pembebanan yang dilakukan pada pemodelan dengan gempa vertikal sebagai berikut.

1. 1,4 D
2. 1,2 D + 0,6 L
3. 1,2 D + 1,0 L
4. 0,9 D
5. 1,2 D + 1,0 L ± (E_x ± 0,3 E_y ± E_z)
6. 1,2 D + 1,0 L ± (E_y ± 0,3 E_x ± E_z)
7. 0,9 D ± (E_y ± 0,3 E_x ± E_z)
8. 1,0 D ± 0,7 (E_x ± 0,3 E_y ± E_z)
9. 1,0 D + 0,75 L ± 0,525 (E_x ± 0,3 E_y ± E_z)
10. 0,6 D ± 0,7 (E_x ± 0,3 E_y ± Ez)

Parameter gempa

Penentuan parameter gempa pada bangunan gedung hotel didasarkan pada SNI 1726:2019 tentang Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung. Gedung hotel terletak pada kawasan Semarang Barat yang memiliki kondisi tanah lunak (SE). Nilai kategori risiko yang digunakan untuk bangunan hotel adalah II dengan faktor keutamaan gempa I_e sebesar 1.

Berdasarkan Desain Spektra Indonesia, kawasan Semarang Barat dengan kondisi tanah lunak (SE) memiliki nilai S_s sebesar 0,8543 g S_1 sebesar 0,3717 g, F_a sebesar 1,2166, F_v sebesar 2,5132, S_{DS} sebesar 0,6929 g, dan S_{D1} sebesar 0,6228g. Sehingga kategori desain seismik yang digunakan adalah D.

Periode fundamental pada bangunan diperhitungkan dengan menggunakan nilai parameter C_t dan x dari tabel 2.12 SNI 1726:2019 untuk tipe struktur semua sistem struktur lainnya. Sehingga didapatkan nilai periode fundamental C_uT_a sebesar 0,9192.

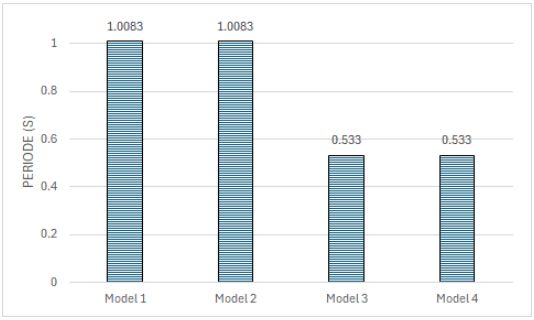
Sistem struktur yang digunakan pada bangunan ini adalah Sistem Rangka Bangunan Dinding Geser Beton Bertulang Khusus, sehingga nilai R yang digunakan sebesar 6, C_d 5, dan Ω_0 sebesar 2,5.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis respons spektrum dilakukan untuk memperoleh respons struktur akibat pembebanan gempa pada setiap model penelitian. Hasil analisis yang diperoleh kemudian dievaluasi dan dibandingkan untuk mengetahui pengaruh variasi model terhadap perilaku struktur. Pembahasan hasil analisis disajikan pada subbab berikut.

Analisis periode getar alami

Berdasarkan hasil pemodelan, terdapat perbedaan yang signifikan pada nilai periode fundamental dari variasi model yang dianalisis. Model 1 dan Model 2 memiliki periode fundamental sebesar 1,01 detik, sedangkan Model 3 dan Model 4 menunjukkan periode fundamental sebesar 0,53 detik. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa struktur pada Model 1 dan Model 2 memiliki tingkat fleksibilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan Model 3 dan Model 4. Secara teoritis, semakin besar kekakuan suatu struktur, maka periode getarnya akan semakin kecil. Oleh karena itu, penambahan dinding geser memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kekakuan lateral bangunan. Grafik perbandingan periode fundamental disajikan dalam Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Periode Fundamental

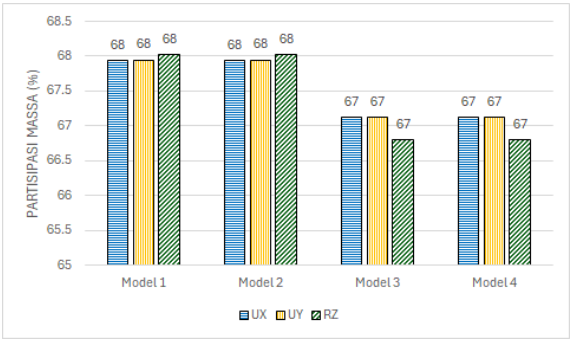
Berdasarkan ketentuan SNI 1726:2019, periode yang digunakan dalam perhitungan gaya geser dasar pada Model 1 dan Model 2 dibatasi menjadi 0,9192 detik sesuai nilai C_uT_a, karena periode fundamental hasil analisis melebihi batas maksimum yang diizinkan. Sementara itu, periode fundamental pada Model 3 dan Model 4 tidak melampaui nilai C_uT_a sehingga dapat langsung digunakan dalam perhitungan gaya geser dasar. Pembatasan periode ini dilakukan agar hasil perhitungan gaya geser dasar tetap berada dalam batas konservatif sesuai ketentuan perencanaan.

Analisis ragam getar

Berdasarkan SNI 1726 pasal 7.9.3.1, mode getar dominan bangunan diharapkan merepresentasikan respons struktur terhadap gempa, yaitu translasi pada 2 arah utama bangunan (X dan Y), sedangkan pada mode berikutnya berupa rotasi.

Hasil analisis pada keempat model menunjukkan bahwa mode pertama didominasi oleh gerak translasi pada arah sumbu X (U_X), mode kedua oleh gerak translasi pada arah sumbu Y (U_Y), sedangkan mode ketiga menunjukkan respons rotasi terhadap sumbu Z (R_Z). Hal ini menunjukkan bahwa distribusi massa dan kekakuan struktur masih mampu menghasilkan respons dinamik yang didominasi oleh gerak translasi pada mode fundamental.

Konsistensi pola ragam getar tersebut menunjukkan bahwa meskipun terjadi peningkatan kekakuan lateral akibat penambahan dinding geser pada Model 3 dan Model 4, konfigurasi struktur secara keseluruhan tetap terjaga dengan baik. Tidak munculnya respons torsional pada mode fundamental menunjukkan bahwa distribusi kekakuan dan massa struktur masih tergolong seimbang. Nilai partisipasi massa yang relatif seragam pada ketiga mode tersebut menunjukkan bahwa karakteristik ragam getar pada seluruh model tetap konsisten, sehingga perubahan konfigurasi dinding geser tidak mengubah perilaku dinamik struktur secara signifikan. Gambar 7 menunjukkan nilai partisipasi massa pada mode pertama (U_X), mode kedua (U_Y), dan mode ketiga (R_Z) untuk setiap model.



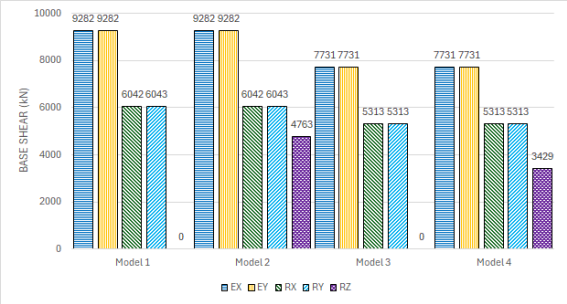
Gambar 7. Grafik Partisipasi Massa

Gaya geser dasar

Gaya geser dasar merupakan gaya lateral total yang bekerja pada dasar struktur akibat pembebanan gempa. Pada analisis ini, gaya geser dasar yang dibandingkan merupakan hasil analisis sebelum dilakukan penskalaan gaya gempa. Berdasarkan hasil analisis, Model 1 dan Model 2

menunjukkan nilai gaya geser dasar yang lebih besar dibandingkan Model 3 dan Model 4.

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa perubahan konfigurasi dinding geser memengaruhi respons gaya geser dasar pada struktur. Selain itu, respons spektrum arah vertikal (R_Z) hanya muncul pada Model 2 dan Model 4 karena kedua model dianalisis dengan penambahan komponen gempa vertikal secara langsung dalam kombinasi pembebanan. Sebaliknya, pada Model 1 dan Model 3, pengaruh gempa vertikal mengikuti ketentuan SNI 1726:2019 melalui faktor 0,2 S_{DS}, sehingga tidak menghasilkan respons R_Z yang terpisah. Gambar 8 menunjukkan perbandingan gaya geser dasar hasil analisis statik ekuivalen pada arah X horizontal (E_X) dan arah Y horizontal (E_Y), serta hasil analisis respons spektrum pada arah X horizontal (R_X), arah Y horizontal (R_Y), dan arah vertikal (R_Z) pada keempat model.

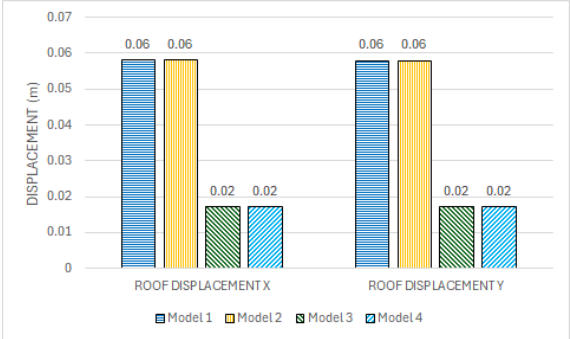


Gambar 8. Grafik Gaya Geser Dasar

Simpangan atap

Simpangan merupakan perpindahan posisi suatu titik pada struktur terhadap kondisi awal akibat pengaruh beban gempa. Parameter ini menggambarkan respons global struktur terhadap pembebanan, dimana semakin besar nilai simpangan, maka semakin besar pergerakan struktur dari posisi semula.

Hasil pemodelan menunjukkan bahwa Model 1 dan Model 2 memiliki nilai simpangan atap sebesar 0,06 m. Sementara itu, pada Model 3 dan 4, nilai simpangan tersebut mengalami reduksi signifikan menjadi 0,02 m. Penurunan ini berkorelasi langsung dengan penambahan elemen dinding geser pada Model 3 dan Model 4 yang secara efektif meningkatkan kekakuan lateral gedung. Hasil simpangan atap ini membuktikan bahwa peningkatan kekakuan struktur jauh lebih dominan dalam mereduksi deformasi dibandingkan peningkatan gaya gempa yang terjadi. Dengan demikian, konfigurasi pada Model 3 dan 4 memberikan tingkat keamanan yang lebih baik dalam membatasi pergerakan struktur, yang pada akhirnya akan meminimalkan risiko kerusakan pada elemen non struktural saat terjadi gempa rencana. Grafik perbandingan simpangan atap disajikan dalam Gambar 9.



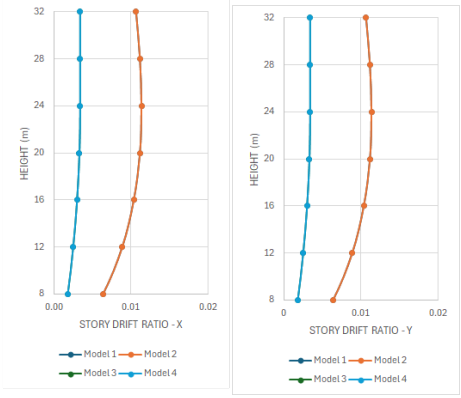
Gambar 9. Grafik simpangan atap

Simpangan antar lantai

Simpangan antar lantai merupakan selisih perpindahan lateral antar lantai yang berurutan akibat pembebanan. Parameter ini menunjukkan besarnya deformasi antar lantai yang terjadi pada struktur. Berdasarkan SNI 1726:2019, batas simpangan antar lantai yang diijinkan sebesar 2% dari tinggi lantai.

Berdasarkan hasil analisis *output* struktur, Model 1 dan Model 2 menunjukkan nilai simpangan antar lantai yang lebih besar dibandingkan Model 3 dan Model 4, baik pada arah X maupun arah Y. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi *L-shaped shear wall* pada Model 3 dan Model 4 memberikan kekakuan lateral yang lebih tinggi sehingga deformasi struktur akibat pembebanan gempa berkurang.

Meskipun demikian, nilai simpangan antar lantai pada seluruh model secara konsisten berada di bawah batas izin yang disyaratkan dalam SNI 1726:2019, yaitu sebesar 2% dari tinggi tingkat. Dengan demikian, seluruh model memenuhi persyaratan batas simpangan antar lantai sesuai ketentuan perencanaan. Grafik perbandingan simpangan antar lantai disajikan pada Gambar 10.

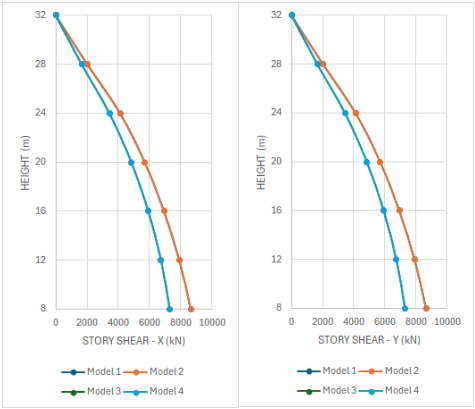


Gambar 10. Grafik Simpangan Antar Tingkat

Gaya geser tingkat

Gaya geser tingkat merupakan gaya geser lateral yang bekerja pada setiap tingkat bangunan akibat pembebanan gempa. Parameter ini menunjukkan gaya internal yang harus dipikul oleh elemen lateral pada struktur.

Berdasarkan hasil analisis, Model 1 dan Model 2 menunjukkan nilai gaya geser tingkat yang lebih tinggi dibandingkan Model 3 dan Model 4, yang mengindikasikan bahwa kedua model tersebut memikul gaya gempa yang lebih besar. Perbedaan gaya geser tingkat antara Model 1 dan Model 2 maupun antara Model 3 dan Model 4 relatif kecil, sehingga pengaruh parameter pembeda dalam masing-masing kelompok tidak signifikan. Meskipun nilai gaya geser pada Model 1 dan Model 2 lebih tinggi, pola distribusi gaya geser pada keempat model tetap relatif serupa sepanjang tinggi bangunan. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan konfigurasi dinding geser meningkatkan kekakuan lateral struktur tanpa mengubah pola distribusi gaya gempa secara signifikan. Grafik perbandingan gaya geser tingkat disajikan pada Gambar 11.



Gambar 11. Grafik Gaya Geser Tingkat

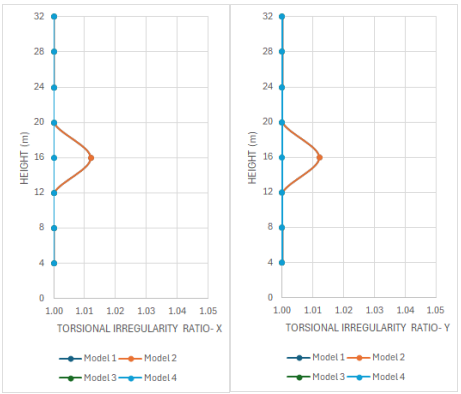
Ketidakberaturan

Berdasarkan SNI 1726:2019, ketidakberaturan diklasifikasikan menjadi ketidakberaturan horizontal dan ketidakberaturan vertikal. Ketidakberaturan horizontal berkaitan dengan ketidaksimetrisan sistem struktur pada bidang denah yang dapat memicu respons torsional, sedangkan ketidakberaturan vertikal terjadi pada sepanjang tinggi bangunan akibat perubahan signifikan karakteristik struktur antar lantai. Parameter ketidakberaturan yang dianalisis dalam penelitian ini meliputi ketidakberaturan torsi, kekakuan tingkat lunak (*soft story*), ketidak beraturan massa, dan kekakan tingkat lemah (*weak story*).

Ketidakberaturan torsi

Berdasarkan SNI 1726:2019 Tabel 13 pasal 1a tentang ketidakberaturan horizontal, ketidakberaturan torsi didefinisikan jika terdapat simpangan antar tingkat maksimum dengan nilai lebih dari 1,2 kali dari simpangan antar tingkat rata-rata pada kedua ujung struktur.

Berdasarkan hasil analisis, Model 1 dan Model 2 menunjukkan nilai rasio konstan di angka 1 pada seluruh ketinggian bangunan. Hal tersebut menunjukkan pada konfigurasi awal, distribusi massa dan kekakuan sangat simetris sehingga tidak menyebabkan terjadinya torsi. Sedangkan pada Model 3 dan Model 4 menunjukkan adanya fluktuasi nilai rasio dengan peningkatan mencapai 1,01 pada elevasi 16 meter. Hal tersebut menunjukkan bahwa penambahan dan perbedaan konfigurasi dinding geser memberikan pengaruh pada letak titik pusat kekakuan. Namun nilai 1,01 masih berada dibawah ambang batas 1,2 sehingga tidak ditemukan ketidakberaturan torsi baik pada Model 1, 2, 3, dan 4. Grafik perbandingan ketidakberaturan torsi disajikan pada Gambar 12.



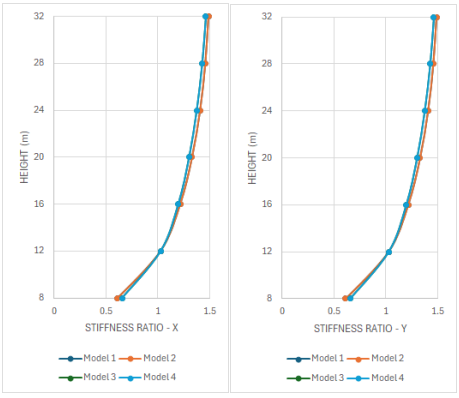
Gambar 12. Grafik Ketidakberaturan Torsi

Ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak

Berdasarkan SNI 1726:2019 Tabel 14 pasal 1a tentang ketidakberaturan vertikal. Kekakuan tingkat lunak didefinisikan jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 70% kekakuan lateral tingkat diatasnya atau kurang dari 80% kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.

Hasil analisis pada grafik rasio kekakuan menunjukkan bahwa pada elevasi bawah (tingkat dasar hingga 8 meter), seluruh model memiliki rasio kekakuan di kisaran 0,62 hingga 0,65. Hal ini mengindikasikan adanya Ketidakberaturan Vertikal Tipe 1a, di mana kekakuan tingkat tersebut lebih kecil dari 70% tingkat di atasnya. Fenomena ini umumnya terjadi akibat adanya perbedaan tinggi antar lantai atau perubahan konfigurasi elemen struktural pada area podium atau lantai dasar.

Meskipun demikian, penggunaan *L-shaped shear wall* pada Model 3 dan Model 4 menunjukkan rasio yang lebih stabil di tingkat menengah hingga atas (elevasi 12 m ke atas) dengan nilai rasio > 1,0. Hal ini membuktikan bahwa penambahan dinding geser mampu menjaga kontinuitas kekakuan struktur di lantai-lantai atas. Untuk memitigasi efek tingkat lunak pada elevasi bawah tersebut, diperlukan pendetailan penulangan yang lebih daktail pada elemen vertikal di lantai dasar guna memastikan struktur mampu mendisipasikan energi gempa tanpa mengalami kegagalan lokal yang tiba-tiba. Grafik perbandingan ketidakberaturan tingkat lunak disajikan pada Gambar 13.

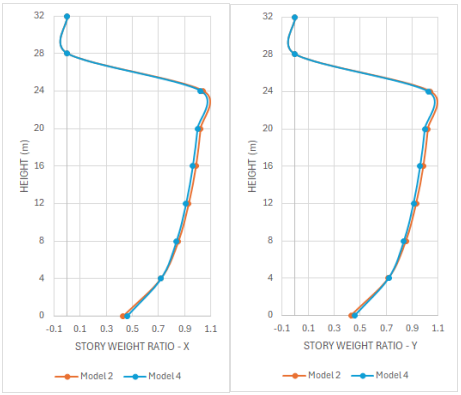


Gambar 13. Grafik Ketidakberaturan Tingkat Lunak

Ketidakberaturan massa

Berdasarkan SNI 1726:2019 Tabel 14 pasal 2 tentang ketidakberaturan vertikal. Ketidakberaturan massa didefinisikan jika massa efektif di sembarang tingkat lebih dari 150% massa efektif tingkat didekatnya. Atap yang lebih ringan dari lantai di bawahnya tidak perlu ditinjau.

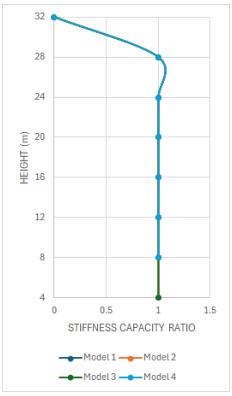
Berdasarkan hasil analisis grafik ketidakberaturan massa, distribusi massa pada elevasi bawah hingga menengah (0-24 meter) menunjukkan pola yang relatif stabil, sehingga mengindikasikan keteraturan massa antar lantai. Fluktuasi rasio massa terlihat pada elevasi 28-32 meter akibat perbedaan massa pada lantai teratas. Namun, berdasarkan ketentuan SNI 1726:2019, massa atap yang lebih kecil dari lantai di bawahnya dikecualikan dari kriteria ketidakberaturan massa. Dengan demikian, seluruh model tetap memenuhi kriteria keteraturan massa vertikal. Grafik perbandingan ketidakberaturan massa disajikan pada Gambar 14.



Gambar 14. Grafik Ketidakberaturan Massa

Ketidakberaturan kekakuan tingkat lemah

Berdasarkan SNI 1726:2019 Tabel 14 pasal 5a tentang ketidakberaturan vertikal. Ketidakberaturan kekakuan tingkat lemah dideginisikan jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 80% kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya. Berdasarkan hasil analisis grafik rasio kekakuan dan kapasitas, seluruh model menunjukkan nilai rasio yang stabil sebesar 1,00 pada elevasi 4-24 meter, yang menandakan distribusi kapasitas lateral antar tingkat berlangsung secara seragam. Penurunan rasio pada elevasi tertinggi dipengaruhi oleh perubahan elemen struktur pada area atap dan tidak dikategorikan sebagai ketidakberaturan. Dengan demikian, seluruh model memenuhi kriteria dan tidak menunjukkan indikasi tingkat lemah. Grafik perbandingan rasio kekakuan dan kapasitas disajikan pada Gambar 15.



Gambar 15. Grafik Rasio Kekakuan dan Kapasitas

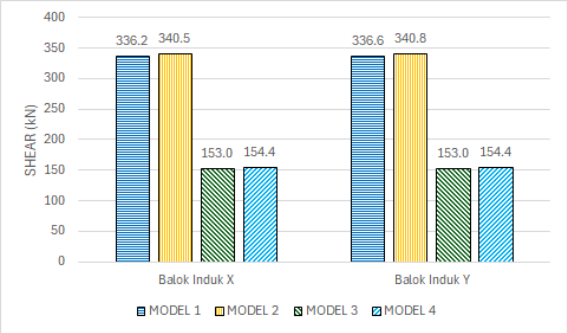
Gaya dalam elemen struktur

Evaluasi gaya dalam pada elemen struktur dilakukan dengan meninjau gaya dalam yang terjadi pada elemen struktural untuk mengetahui distribusi gaya akibat pembebanan serta kapasitas elemen dalam menahan beban kerja.

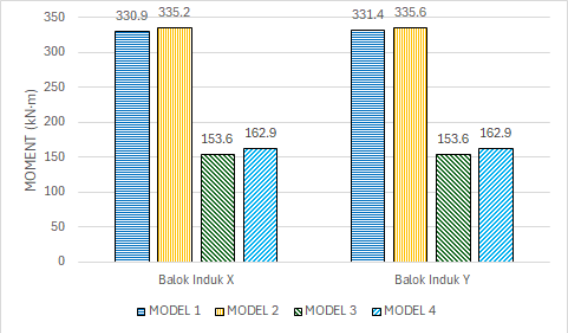
Balok induk

Gaya dalam pada balok induk dievaluasi pada lantai tengah bangunan, yaitu pada lantai 5. Pemilihan tersebut dilakukan karena lantai tengah dianggap mampu merepresentasikan distribusi gaya internal struktur secara stabil, tanpa pengaruh dominan efek batas pada lantai dasar maupun lantai atap.

Hasil analisis menunjukkan bahwa perubahan konfigurasi struktur dari Model 1 dan Model 2 ke Model 3 dan Model 4 menyebabkan penurunan gaya geser dan momen pada balok secara signifikan, mencapai sekitar 55%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem *L-shaped shearwall* berperan dominan dalam menahan beban lateral akibat gempa, sehingga kontribusi balok induk dalam memikul gaya menjadi lebih kecil. Sementara itu, penambahan komponen gempa vertikal pada Model 2 dan Model 4 menghasilkan peningkatan respons internal yang relatif kecil, yang mengindikasikan bahwa pengaruh gempa vertikal terhadap balok tetap ada, namun tidak sebesar pengaruh peningkatan kekakuan dari sistem dinding geser. Grafik perbandingan gaya geser dan momen pada balok induk disajikan pada Gambar 16 dan Gambar 17.



Gambar 16. Grafik Gaya Geser Balok Induk

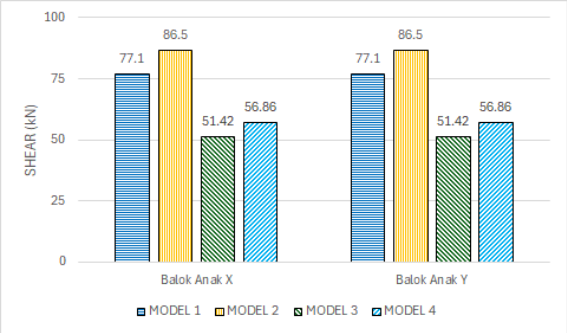


Gambar 17. Grafik Momen Balok Induk

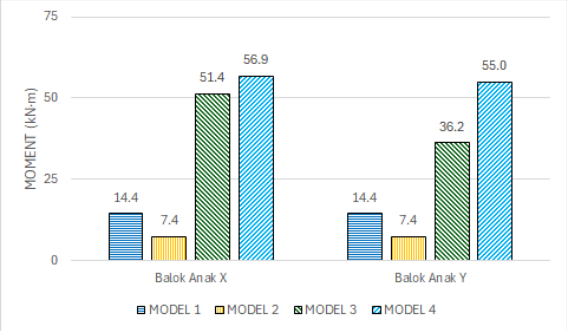
Balok anak

Gaya dalam pada balok anak konsisten dievaluasi pada lantai yang sama dengan balok induk, sehingga dievaluasi pada balok anak pada lantai 5. Hasil analisis menunjukkan perilaku yang berbeda pada balok anak arah X dan Y, di mana nilai momen pada Model 3 dan Model 4 mengalami peningkatan yang cukup signifikan dibandingkan Model 1 dan Model 2.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pada sistem *L-shaped shearwall*, balok anak tidak lagi hanya bekerja sebagai elemen pemikul beban gravitasi, tetapi juga ikut berperan dalam menghubungkan respons struktur antar dinding geser. Kekakuan dinding geser yang lebih besar menyebabkan rotasi dan deformasi antar dinding ditransfer ke balok penghubung, sehingga momen yang terjadi pada ujung balok anak menjadi lebih besar. Grafik perbandingan gaya geser dan momen pada balok anak disajikan pada Gambar 18 dan Gambar 19.



Gambar 18. Grafik Gaya Geser Balok Anak

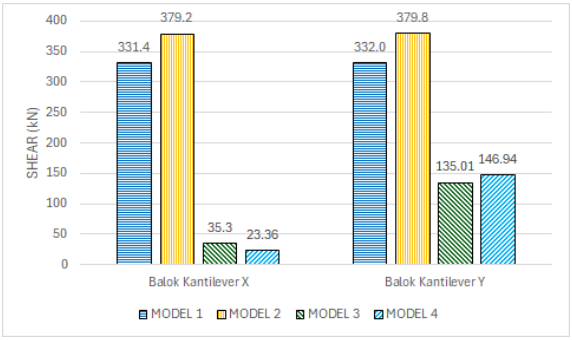


Gambar 19. Grafik Momen Balok Anak

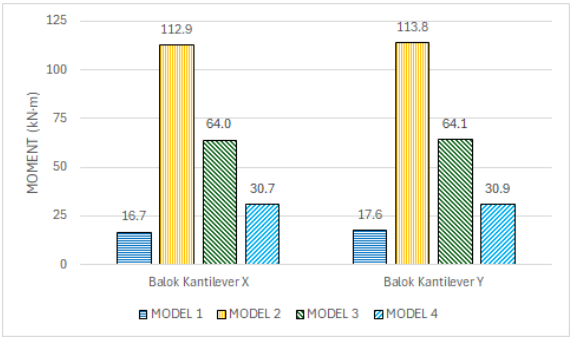
Balok kantilever

Gaya dalam pada balok kantilever dievaluasi pada balok yang berada pada lantai 8. Pemilihan tersebut berdasarkan pada posisi elevasi yang tinggi, sehingga pengaruh respons dinamik vertikal terhadap elemen kantilever menjadi lebih signifikan. Selain itu, beban pada lantai 8 merupakan beban tipikal bangunan, sehingga dianggap lebih representatif dibandingkan dengan elemen yang berada pada elevasi atap yang hanya menerima beban atap.

Hasil analisis pada balok kantilever arah X dan Y menunjukkan bahwa elemen ini memiliki respons yang paling sensitif terhadap pengaruh gempa vertikal, terutama pada momen lentur. Pada Model 2, nilai momen meningkat signifikan dan menjadi yang tertinggi dibanding model lainnya, yang menunjukkan bahwa penambahan komponen gempa vertikal memberikan efek amplifikasi yang besar pada ujung bebas kantilever. Kondisi ini terjadi karena pada sistem *planar shearwall*, kekakuan struktur masih relatif lebih rendah sehingga deformasi dan rotasi pada tumpuan lebih mudah terjadi. Sebaliknya, pada Model 4 terjadi penurunan respons yang cukup signifikan, yang menunjukkan bahwa penggunaan *L-shaped shearwall* mampu meningkatkan kekakuan dan stabilitas pada daerah tumpuan kantilever, sehingga getaran dan konsentrasi momen akibat gempa vertikal dapat dikurangi secara lebih efektif. Grafik perbandingan gaya geser dan momen pada balok kantilever disajikan pada Gambar 20 dan Gambar 21.



Gambar 20. Grafik Gaya Geser Balok Kantilever



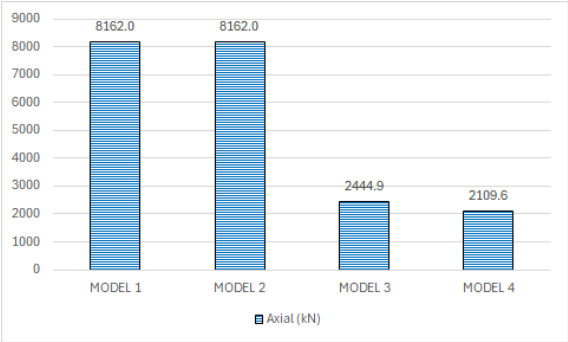
Gambar 21. Grafik Momen Balok Kantilever

Kolom

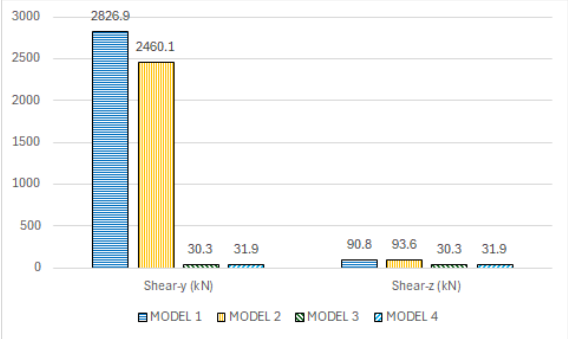
Gaya dalam pada elemen kolom yang dievaluasi merupakan kolom yang berada di lantai dasar. Pemilihan tersebut didasarkan pada kondisi bahwa kolom di lantai dasar menerima gaya aksial terbesar akibat akumulasi beban dari seluruh lantai di atasnya, sehingga menjadi elemen yang paling kritis untuk dievaluasi.

Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan sistem *L-shaped shearwall* memberikan perubahan yang signifikan terhadap respons internal kolom. Gaya aksial pada kolom menurun secara drastis dibanding model *planar shearwall*, yang menunjukkan terjadinya distribusi beban antara kolom dan dinding geser sehingga beban tekan pada kolom menjadi lebih kecil. Selain itu, gaya geser kolom juga mengalami penurunan yang sangat signifikan dan menjadi lebih seimbang pada kedua arah, yang mengindikasikan bahwa sebagian besar gaya lateral telah dipikul oleh elemen dinding geser. Perubahan serupa juga terlihat pada respons momen, dimana distribusi momen pada kolom menjadi lebih merata dan simetris dibanding model awal yang menunjukkan dominasi pada satu arah. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada sistem *L-shaped*

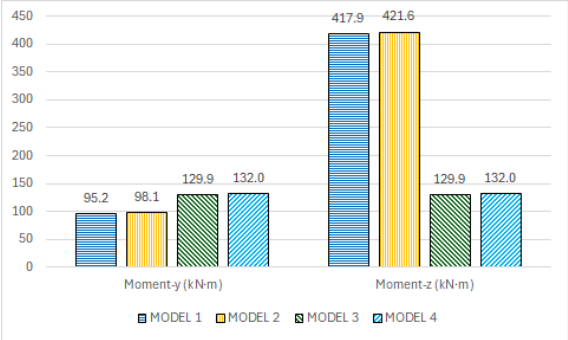
shearwall, fungsi kolom bergeser dari elemen penahan kombinasi gaya aksial, geser, dan lentur menjadi lebih dominan sebagai elemen pemikul beban tekan. Grafik perbandingan gaya aksial, gaya geser, dan momen pada kolom disajikan pada Gambar 22 hingga Gambar 24.



Gambar 22. Grafik Aksial Kolom



Gambar 23. Grafik Gaya Geser Kolom



Gambar 24. Grafik Momen Kolom

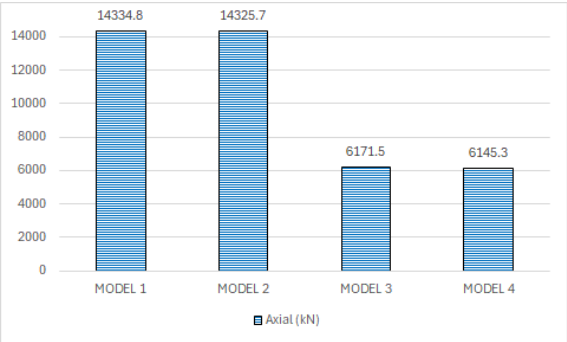
Dinding geser

Gaya dalam pada elemen dinding geser dievaluasi merupakan elemen dinding geser yang berada pada lantai dasar. Pemilihan tersebut konsisten dengan pemilihan elemen kolom yang sama-sama menahan gaya kumulatif dari lantai-lantai diatasnya.

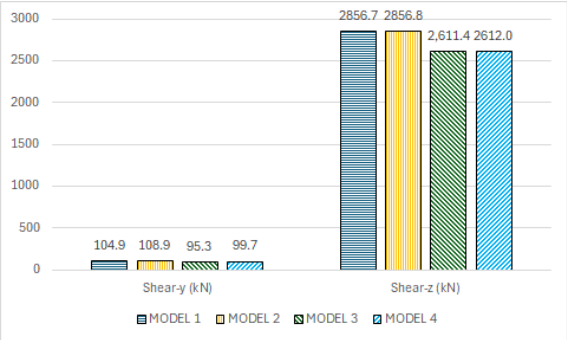
Hasil analisis menunjukkan bahwa perubahan dari *planar shearwall* ke *L-shaped shearwall* membuat distribusi gaya internal berubah cukup jelas. Gaya aksial pada dinding geser menurun karena beban gravitasi terbagi ke dua dinding, sehingga masing-masing elemen bekerja lebih proporsional. Namun, dinding geser tetap memikul gaya geser lateral yang besar, sehingga fungsinya sebagai elemen utama penahan gempa tidak berubah.

Di sisi lain, momen pada Model 3 dan Model 4 meningkat, yang menunjukkan bahwa lebih banyak gaya lateral berubah menjadi efek *overturning* dan langsung ditahan oleh sistem *L-shaped shearwall*. Nilai torsi juga cenderung naik, menandakan distribusi gaya yang lebih kompleks akibat peningkatan kekakuan dan interaksi antar elemen struktur.

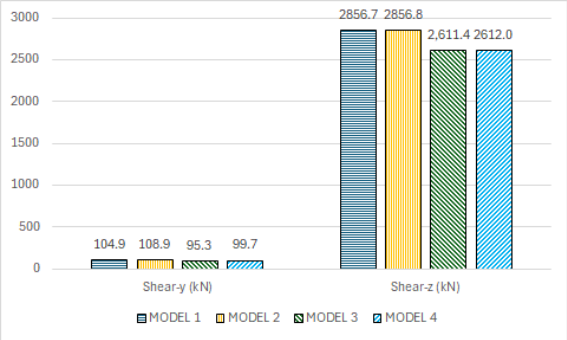
Secara keseluruhan, penggunaan *L-shaped shearwall* membuat beban lateral lebih terpusat pada dinding geser dan mengurangi ketergantungan pada elemen rangka. Grafik perbandingan gaya aksial, gaya geser, torsi dan momen pada kolom disajikan pada Gambar 25 hingga Gambar 28.



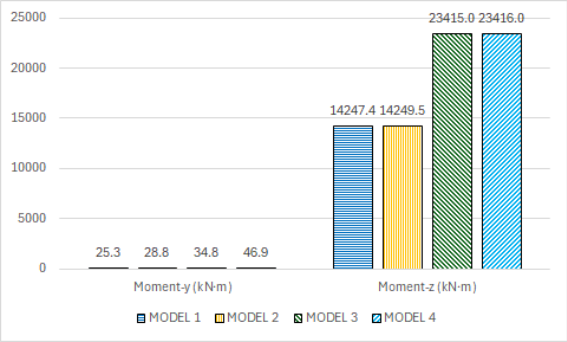
Gambar 25. Grafik Aksial Dinding Geser



Gambar 26. Grafik Gaya Geser Dinding Geser



Gambar 27. Grafik Torsi Dinding Geser



Gambar 28. Grafik Momen Dinding Geser

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi *L-shaped shearwall* memberikan peningkatan kinerja struktur yang paling efektif pada bangunan bertingkat dengan elemen kantilever terhadap pengaruh gempa vertikal maupun lateral. Penambahan dinding geser mampu meningkatkan kekakuan lateral struktur secara signifikan, yang ditunjukkan oleh penurunan periode getar alami hingga 47,5% serta reduksi perpindahan atap dan simpangan antar lantai secara konsisten. Keberadaan dinding geser yang digandakan juga mengubah mekanisme distribusi gaya dalam struktur, di mana dinding geser berperan dominan dalam menahan gaya lateral dan efek *overturning*, sehingga beban yang diterima balok induk dan kolom menjadi lebih kecil dan lebih merata. Pada elemen kantilever, peningkatan kekakuan struktur terbukti efektif mengurangi konsentrasi momen akibat amplifikasi gempa vertikal, sehingga respons struktur menjadi lebih stabil dan terkendali.

Meskipun model dengan kekakuan lebih tinggi menghasilkan gaya geser dasar yang lebih besar, seluruh model tetap memenuhi persyaratan kinerja struktur berdasarkan SNI 1726:2019 dengan nilai simpangan antar tingkat di bawah batas izin. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan konfigurasi *L-shaped shearwall* tidak hanya meningkatkan kekuatan dan stabilitas struktur, tetapi juga menghasilkan sistem struktur yang lebih optimal, aman, dan efisien untuk bangunan bertingkat dengan kantilever yang sensitif terhadap pengaruh gempa vertikal.

5. DAFTAR PUSTAKA

Baig, M. A., & Rashid, R. (2020). EFFECT OF SHEAR WALL ON PERFORMANCE OF MULTISTOREY. *International Journal of Engineering Science Technologies*, 26–39.

Bolourani, A., Asce, S. M., Burton, H. V, Asce, M., Bozorgnia, Y., & Asce, F. (2025). Evaluation of Vertical Seismic Load Effects Specified in the United States Building Code. *JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING*, *151*(12). https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-14498

Erdem, R. T., & Gucuyen, E. (2025). IMPACT LOADING ON RC CANTILEVER BEAM. *Comptes Rendus de l'Acad´emie Bulgare Des Sciences*, *78*(3), 410–418.

Ghanem, A., Asce, S. M., Lee, Y., Asce, A. M., Moon, D., & Asce, A. M. (2024). Seismic Vulnerability of Reinforced Concrete Frame Structures : Obtaining Plan or Vertical Mass Irregularity from Structure Use Change. *JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING*, *150*(3), 1–13. https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-12440.

Hasrouri, S., Kadid, A., & Yahiaoui, D. (2025). The Impact of Vertical Seismic Component on Concrete Structures : Analysis and Design according to the Algerian Seismic Code (RPA. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, *15*(3), 23823–23833.

Hussain, N., Alam, M. S., & Mwafy, A. (2024). Seismic design coefficients verification of regular and vertically irregular high-rise shear wall buildings using bidirectional horizontal ground motions and 3D modeling. *Structures*, *70*(October), 107835. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107835

Isık, E., Büyüksaraç, A., Ekinci, Y. L., Mehmet Cihan Aydın, & Harirchian, E. (2020). The Effect of Site-Specific Design Spectrum on Earthquake-Building Parameters : A Case Study from the Marmara Region (NW Turkey). *Applied Sciences*, *10*.

Işık, E., Harirchian, E., Bilgin, H., & Jadhav, K. (2021). The effect of material strength and discontinuity in RC structures according to different site-specific design spectra. *RESEARCH ON ENGINEERING STRUCTURES & MATERIAL*, *7*(3).

Lee, D., & Kang, S. (2024). Safe Seismic Design of Intermediate Precast Shear Wall System. *Journal of Structural Engineering*, *150*(9), 1–14. https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-13322.

Manoukas, G. (2026). Implications of vertical ground motion on reinforced concrete frame buildings with beams supporting columns. *Structures*, *84*(May 2025), 111051. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.111051

Maverick, J., Joelin, G. C., Kusbiantoro, K., Lesmana, C., Studi, P., Teknik, S., Maranatha, U. K., Studi, P., Arsitektur, S., & Maranatha, U. K. (2025). Evaluasi Kinerja Struktur Rangka Beton Bertulang Bangunan Eksisting di Samarinda. *JMTS : Jurnal Mitra Teknik Sipil*, *8*(1), 179–192.

Mwafy, A., & Khalifa, S. (2017). Effect of vertical structural irregularity on seismic design of tall buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, *26*(18). https://doi.org/10.1002/tal.1399

Patria, A. S. N., & Haq, Y. A. (2024). Pengaruh Konfigurasi Shearwall terhadap Kapasitas Struktur Gedung Bertingkat. *Menara : Jurnal Teknik Sipil*, *19*(2).

Reddy, R. K., Ravella, D. P., Reddy, P. S., & Kumar, S. M. (2024). STUDY OF EFFECTIVE LOCATION OF SHEAR WALL IN MULTI-STOREYED BUILDINGS FOR OPTIMUM SEISMIC RESPONSE. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, *19*(12), 740–746. www.arpnjournals.com

Xiao, Y. (2019). Experimental Methods for Seismic Simulation of Structural Columns : State-of-the-Art Review and Introduction of New Multiuse Structural Testing System. *JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING*, *145*(3), 1–11. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002269.