

KAJIAN IMPLIKASI STRUKTURAL PENGGUNAAN KOLOM PIPIH PADA BANGUNAN BETON BERTULANG BERTINGKAT RENDAH DI WILAYAH GEMPA TINGGI

I Wayan Artana¹, I Wayan Muka²

^{1,2}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Perencanaan dan Informatika, Universitas Hindu Indonesia, Jl. Sangalangit, Tembau, Penatih, Denpasar, Bali

Email: ¹artana.str2@gmail.com, ²wayanmuka@unhi.ac.id

ABSTRAK

Penggunaan kolom pipih pada bangunan beton bertulang bertingkat rendah semakin sering dijumpai pada struktur bangunan di Bali. Kondisi ini umumnya dipengaruhi oleh estetika arsitektur. Meskipun secara arsitektural memberikan keuntungan, penggunaan kolom pipih pada wilayah gempa tinggi perlu dikaji secara hati-hati karena dapat memengaruhi kekakuan lateral, kapasitas lentur, daktilitas, konsentrasi tegangan, dan mekanisme terbentuknya sendi plastis. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh penggunaan kolom pipih terhadap respons bangunan beton bertulang bertingkat rendah di wilayah gempa tinggi melalui simulasi numerik berbasis metode elemen hingga. Model yang dianalisis berupa portal beton bertulang tiga lantai dengan sistem rangka pemikul momen. Variasi penampang kolom yang digunakan meliputi kolom normal 300 mm × 300 mm, serta kolom pipih 200 mm × 450 mm, 150 mm × 500 mm, dan 120 mm × 600 mm. Pembebanan gravitasi mengacu pada SNI 1727:2020 dan respons spektrum gempa mengacu pada SNI 1726:2019 untuk kondisi tanah sedang wilayah Denpasar. Validasi model dilakukan melalui pemeriksaan periode fundamental, berat seismik, dan studi konvergensi segmentasi elemen. Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin pipih penampang kolom, semakin besar ketidakseimbangan kekakuan antara arah kuat dan arah lemah. Pada model kolom 120 mm × 600 mm, simpangan antar tingkat arah lemah meningkat sekitar 31,8% dibandingkan model kolom 300 mm × 300 mm, sedangkan rasio kapasitas kolom pada beberapa elemen lantai dasar mendekati 0,94. Analisis pushover juga menunjukkan bahwa kolom pipih cenderung mempercepat terbentuknya sendi plastis pada kolom lantai dasar arah lemah. Dengan demikian, penggunaan kolom pipih pada bangunan bertingkat rendah di wilayah gempa memerlukan pembatasan rasio aspek, pengendalian orientasi kolom, detailing pengekanan transversal yang lebih rapat, serta evaluasi kinerja gempa sejak tahap awal perencanaan.

Kata kunci: kolom pipih, beton bertulang, bangunan bertingkat rendah, wilayah gempa tinggi, metode elemen hingga

ABSTRACT

The use of flat columns in low-rise reinforced concrete buildings is increasingly found in Bali, mainly due to architectural aesthetic considerations. Although beneficial for architectural layout, flat columns in high seismic regions require careful evaluation because they may affect lateral stiffness, flexural capacity, ductility, stress concentration, and plastic hinge formation. This study evaluates the effect of flat columns on the seismic response of low-rise reinforced concrete buildings using finite element-based numerical simulation. The analyzed model is a three-story reinforced concrete moment-resisting frame with column variations of 300 mm × 300 mm, 200 mm × 450 mm, 150 mm × 500 mm, and 120 mm × 600 mm. Gravity loads refer to SNI 1727:2020, while seismic response spectrum analysis refers to SNI 1726:2019 for medium soil conditions in Denpasar. Model validation was carried out by checking the fundamental period, seismic weight, and element segmentation convergence. The results show that flatter column sections produce greater stiffness imbalance between the strong and weak directions. In the 120 mm × 600 mm column model, weak-axis inter-story drift increased by approximately 31.8% compared with the 300 mm × 300 mm column model, while the capacity ratio of several ground-floor columns approached 0.94. Pushover analysis indicates that flat columns tend to accelerate plastic hinge formation in ground-floor columns along the weak direction. Therefore, flat columns in low-rise buildings located in seismic regions require aspect ratio limitation, proper column orientation, closer transverse confinement detailing, and seismic performance evaluation from the early design stage.

Keywords: flat column, reinforced concrete, low-rise building, high seismic region, finite element method

1. PENDAHULUAN

Perkembangan bangunan bertingkat rendah di Bali dalam menunjukkan kecenderungan yang cukup khas.

Pada rumah tinggal, rumah toko, vila, penginapan kecil, dan fasilitas komersial di kawasan perkotaan maupun pariwisata, kolom struktur sering diupayakan

tidak menonjol ke dalam ruang. Keinginan arsitektural tersebut kemudian melahirkan permintaan untuk penggunaan kolom pipih, yaitu kolom dengan salah satu dimensi penampang yang jauh lebih kecil daripada dimensi lainnya. Dalam praktik lapangan, bentuk ini dianggap menguntungkan karena ruang menjadi lebih bersih, dinding lebih mudah ditata, dan tampilan interior terasa lebih rapi. Hal ini sering kali menimbulkan perdebatan antara pertimbangan arsitektur dan pemenuhan kriteria struktur.

Dalam konteks struktur beton bertulang di wilayah gempa tinggi, penggunaan kolom pipih tidak dapat dipandang hanya sebagai persoalan bentuk, melainkan perbedaan perilakunya dalam menerima beban. Kolom adalah elemen utama yang menerima beban aksial dan lentur akibat kombinasi beban gravitasi serta beban lateral. Ketika penampang kolom dibuat pipih, kapasitas lentur dan kekakuan kolom menjadi sangat bergantung pada arah pembebanan. Pada arah kuat, kolom dapat menjadi cukup kaku. Sebaliknya, pada arah lemah, kapasitas lentur dan kekakuannya jauh lebih rendah. Ketidakseimbangan ini menjadi semakin penting pada bangunan bertingkat rendah yang umumnya memiliki keteraturan struktur terbatas, mutu pelaksanaan bervariasi, dan kadang-kadang tidak dianalisis dengan pendekatan kinerja gempa secara memadai.

SNI 2847:2019, Pasal 18.7.2.1 memberi batasan lebar/dimensi terkecil kolom minimum 300 mm untuk struktur dengan sistem Rangka Pemikul momen khusus yang umumnya termasuk dalam kriteria perencanaan di wilayah Bali. Oleh sebab itu, penerapan SNI 1726:2019 dan SNI 2847:2019 menjadi penting, terutama untuk menjamin bahwa sistem struktur memiliki kekuatan, kekakuan, dan daktilitas yang cukup. Dari pengamatan pada beberapa bangunan kecil di lapangan, kolom pipih sering dipasang dengan orientasi mengikuti dinding tanpa evaluasi menyeluruh terhadap arah gempa dominan dan konfigurasi portal. Keadaan ini berpotensi menimbulkan simpangan antar tingkat yang lebih besar pada arah tertentu, konsentrasi kerusakan pada lantai dasar, serta mekanisme soft story apabila kolom lantai bawah tidak mempunyai cadangan kapasitas yang cukup.

Penelitian mengenai perilaku kolom beton bertulang akibat beban gempa sudah banyak dilakukan, baik melalui eksperimen maupun simulasi numerik. Akan tetapi, kajian yang secara khusus membahas implikasi penggunaan kolom pipih pada bangunan beton bertulang bertingkat rendah dengan konteks praktik perencanaan di Bali masih relatif terbatas. Gap inilah yang menjadi dasar penelitian ini. Studi ini tidak hanya membandingkan angka gaya dalam, tetapi juga melihat perubahan perilaku sistem struktur, khususnya simpangan lateral, rasio kapasitas, distribusi sendi plastis, dan kecenderungan mekanisme keruntuhan.

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis respons struktur bangunan beton bertulang bertingkat rendah dengan variasi bentuk penampang kolom normal dan kolom pipih, mengevaluasi pengaruh rasio aspek kolom terhadap simpangan antar tingkat, gaya

dalam, rasio kapasitas, dan distribusi sendi plastis serta memberikan rekomendasi teknis awal mengenai batas penggunaan kolom pipih pada bangunan bertingkat rendah di wilayah gempa tinggi.

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bangunan yang dianalisis berupa bangunan beton bertulang tiga lantai dengan fungsi rumah toko/vila kecil dan sistem rangka pemikul momen.
2. Analisis dilakukan secara numerik menggunakan Autodesk Robot Structural Analysis Professional dengan pendekatan elemen frame nonlinear.
3. Penelitian ini tidak mempertimbangkan batasan yang diberikan pada SNI 2847:2019, Pasal 18.7.2.1 lebar/dimensi terkecil kolom minimum 300 mm untuk struktur dengan sistem Rangka Pemikul Momen Khusus
4. Variasi penampang kolom yang digunakan adalah 300 mm × 300 mm, 200 mm × 450 mm, 150 mm × 500 mm, dan 120 mm × 600 mm.
5. Mutu beton yang digunakan adalah $f_c' = 25$ MPa, tulangan longitudinal $f_y = 400$ MPa, dan tulangan transversal $f_{ys} = 280$ MPa.
6. Pembebanan gravitasi mengacu pada SNI 1727:2020, sedangkan pembebanan gempa mengacu pada SNI 1726:2019.
7. Interaksi tanah-struktur tidak dimodelkan secara eksplisit; tumpuan dasar dianggap jepit.
8. Hasil numerik dalam artikel ini merupakan hasil simulasi model penelitian dan perlu diverifikasi lebih lanjut apabila diterapkan pada desain bangunan aktual.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Sistem Rangka Pemikul Momen

Kolom beton bertulang berfungsi sebagai elemen tekan-lentur yang menyalurkan beban dari balok dan pelat menuju fondasi. Pada wilayah gempa tinggi, kolom tidak hanya dituntut kuat terhadap beban aksial, tetapi juga harus memiliki kapasitas lentur, geser, dan daktilitas yang cukup. Prinsip dasar perencanaan tahan gempa menghendaki mekanisme keruntuhan yang terkendali, yaitu kerusakan lentur lebih dahulu terjadi pada balok, sedangkan kolom tetap memiliki cadangan kapasitas agar tidak terjadi mekanisme lantai lunak.

Dalam kerangka desain kapasitas, kolom perlu direncanakan lebih kuat daripada balok yang bertemu pada suatu joint. Hal ini penting karena kegagalan kolom biasanya berdampak langsung terhadap stabilitas global bangunan. Pada bangunan bertingkat rendah, bahaya ini sering kurang diperhatikan karena jumlah lantai dianggap sedikit. Padahal pengalaman pascagempa menunjukkan bahwa bangunan rendah pun dapat mengalami kerusakan berat apabila konfigurasi kolom tidak memadai, terutama pada lantai dasar yang terbuka atau memiliki perubahan kekakuan mendadak.

Karakteristik Kolom Pipih

Kolom pipih dapat dipahami sebagai kolom persegi panjang dengan rasio dimensi penampang yang cukup besar. Dalam penelitian ini, rasio aspek kolom didefinisikan sebagai perbandingan antara dimensi panjang penampang terhadap dimensi pendek penampang:

$$R_a = h_c / b_c$$

Keterangan: R_a = rasio aspek kolom; h_c = dimensi panjang penampang kolom; b_c = dimensi pendek penampang kolom.

Pada kolom persegi 300 mm × 300 mm, nilai $R_a = 1,00$. Pada kolom 120 mm × 600 mm, nilai $R_a = 5,00$. Secara mekanika struktur, momen inersia terhadap sumbu kuat dan sumbu lemah akan berbeda cukup besar. Untuk penampang persegi panjang, momen inersia dapat dihitung dengan:

$$I_x = b h^3 / 12 \quad \text{dan} \quad I_y = h b^3 / 12$$

Perbedaan nilai I_x dan I_y menjelaskan mengapa kolom pipih dapat sangat kaku pada satu arah, tetapi jauh lebih fleksibel pada arah lainnya. Pada beban gempa yang sifatnya bolak-balik dan dapat bekerja pada dua arah utama bangunan, kondisi ini tidak boleh diabaikan.

C. Simpangan Antar Tingkat

Simpangan antar tingkat merupakan salah satu parameter utama untuk menilai kinerja struktur terhadap beban gempa. Simpangan antar tingkat dihitung sebagai selisih perpindahan lateral dua lantai yang berurutan, kemudian dibandingkan dengan tinggi tingkat:

$$\theta_i = (\Delta_i - \Delta_{i-1}) / h_i$$

Keterangan: θ_i = drift ratio tingkat ke- i ; Δ_i = perpindahan lateral lantai ke- i ; Δ_{i-1} = perpindahan lateral lantai di bawahnya; h_i = tinggi tingkat.

Simpangan yang terlalu besar dapat menyebabkan kerusakan nonstruktural, ketidaknyamanan, dan pada kondisi ekstrem dapat menunjukkan degradasi kekakuan struktur. Pada bangunan dengan kolom pipih, simpangan arah lemah menjadi perhatian utama.

Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga banyak digunakan untuk menganalisis struktur beton bertulang karena mampu memodelkan kekakuan elemen, distribusi gaya dalam, deformasi, serta perilaku nonlinear melalui idealisasi sendi plastis. Dalam perangkat lunak Robot Structural Analysis, elemen balok dan kolom umumnya dimodelkan sebagai frame element dengan enam derajat kebebasan pada setiap nodal. Perilaku nonlinear dapat dimasukkan melalui plastic hinge pada lokasi yang berpotensi mengalami plastifikasi, terutama ujung balok dan kolom.

Untuk analisis kinerja gempa, pendekatan pushover memberikan gambaran kapasitas lateral struktur melalui hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan atap. Meskipun tidak menggantikan

analisis riwayat waktu nonlinear, pushover cukup berguna untuk melihat urutan plastifikasi, daktilitas global, dan kecenderungan mekanisme keruntuhan pada bangunan bertingkat rendah.

Ketentuan Standar Terkait

SNI 1726:2019 mengatur tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung, termasuk penentuan kategori risiko, kelas situs, parameter percepatan spektral, faktor keutamaan gempa, faktor modifikasi respons, serta batasan simpangan antar tingkat. SNI 2847:2019 mengatur persyaratan beton struktural, termasuk desain lentur, aksial, geser, pengekangan transversal, dan detailing elemen struktur pada sistem rangka pemikul momen. Sementara itu, SNI 1727:2020 digunakan sebagai rujukan pembebanan minimum untuk beban mati, beban hidup, dan beban terkait lainnya.

Dalam konteks penelitian ini, ketiga standar tersebut digunakan sebagai dasar pembebanan, kombinasi beban, dan evaluasi kelayakan respons struktur. Pedoman ASCE 41 dan FEMA digunakan sebagai rujukan tambahan untuk interpretasi kinerja struktur dan pembentukan sendi plastis.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode simulasi numerik berbasis metode elemen hingga. Objek penelitian berupa model bangunan beton bertulang tiga lantai yang dianalisis dalam beberapa variasi bentuk kolom. Tahapan penelitian dimulai dari penentuan geometri bangunan, penentuan mutu material, pemodelan struktur, pembebanan gravitasi dan gempa, analisis respons spektrum, analisis pushover, validasi model, kemudian interpretasi hasil.

Pendekatan yang digunakan bersifat komparatif, yaitu membandingkan perilaku struktur dengan kolom normal dan struktur dengan kolom pipih. Model dasar kolom normal dijadikan kontrol. Selanjutnya, model kolom pipih dianalisis dengan luas penampang yang relatif sebanding atau mendekati model kontrol, sehingga pengaruh utama yang diamati adalah perubahan bentuk penampang dan orientasi kekakuan, bukan semata-mata perbedaan volume beton.

Bangunan model diasumsikan berfungsi sebagai rumah toko/vila kecil tiga lantai dengan denah berukuran 12 m × 9 m. Jarak antar portal arah X adalah 4 m, sedangkan arah Y adalah 3 m. Tinggi lantai dasar 3,8 m dan tinggi lantai berikutnya 3,5 m. Sistem struktur berupa rangka beton bertulang dengan pelat lantai beton bertulang yang dimodelkan sebagai diafragma kaku.

Tabel 3.1 Data Geometri Bangunan Model

Parameter	Nilai
Jumlah lantai	3 lantai
Ukuran denah	12 m x 9 m

Jarak portal arah X	4 m
Jarak portal arah Y	3 m
Tinggi lantai dasar	3,8 m
Tinggi lantai 2 dan 3	3,5 m
Tebal pelat	120 mm
Dimensi balok induk	250 mm x 450 mm
Dimensi balok anak	200 mm x 350 mm
Sistem struktur	Rangka beton bertulang

Sumber: Model penelitian, 2026

Variasi Penampang Kolom

Variasi penampang kolom ditentukan untuk mewakili kondisi umum yang dijumpai pada bangunan bertingkat rendah. Kolom normal digunakan sebagai model kontrol, sedangkan kolom pipih dibuat dengan dimensi pendek yang semakin kecil dan dimensi panjang yang semakin besar.

Tabel 3.2 Variasi Penampang Kolom

Kode Model	Dimensi Kolom	Luas Penampang	Rasio Aspek	Keterangan
M-1	300 mm × 300 mm	90.000 mm ²	1,00	Kolom normal/kontrol
M-2	200 mm × 450 mm	90.000 mm ²	2,25	Kolom pipih sedang
M-3	150 mm × 500 mm	75.000 mm ²	3,33	Kolom pipih tinggi
M-4	120 mm × 600 mm	72.000 mm ²	5,00	Kolom sangat pipih

Sumber: Model penelitian, 2026

Material Properties

Mutu beton dan baja tulangan ditentukan berdasarkan praktik umum bangunan beton bertulang bertingkat rendah di Bali. Beton menggunakan kuat tekan $f_c' = 25$ MPa, modulus elastisitas beton dihitung dengan pendekatan SNI 2847:2019, sedangkan baja tulangan longitudinal menggunakan $f_y = 400$ MPa.

Dengan $f_c' = 25$ MPa, diperoleh E_c sekitar 23.500 MPa.

Tabel 3.3 Properti Material Model

Material	Parameter	Nilai
Beton	f_c'	25 MPa
Beton	E_c	23.500 MPa
Beton	Berat jenis	24 kN/m ³
Baja tulangan utama	f_y	400 MPa
Baja tulangan sengkang	f_{ys}	280 MPa
Baja tulangan	E_s	200.000 MPa

Sumber: SNI 2847:2019 dan asumsi model penelitian

Pemodelan Elemen Hingga

Pemodelan struktur dilakukan dengan Autodesk Robot Structural Analysis Professional. Balok dan kolom dimodelkan sebagai frame element tiga dimensi. Pelat lantai tidak dimodelkan sebagai shell penuh pada seluruh variasi, tetapi kontribusi berat pelat dimasukkan sebagai beban area yang disalurkan ke balok, sedangkan perilaku diafragma lantai didefinisikan sebagai rigid diaphragm. Pendekatan ini dipilih agar fokus analisis tetap pada perubahan perilaku rangka akibat variasi kolom.

Setiap elemen balok dan kolom dibagi menjadi 4 segmen internal untuk meningkatkan ketelitian distribusi deformasi dan lokasi sendi plastis. Pada studi sensitivitas, segmentasi elemen diuji dengan 2, 4, dan 8 segmen. Perbedaan perpindahan atap antara 4 dan 8 segmen kurang dari 2,5%, sehingga segmentasi 4 dipandang cukup stabil untuk analisis komparatif.

Boundary Condition

Tumpuan dasar kolom dimodelkan sebagai jepit penuh dengan pembatasan translasi dan rotasi pada tiga arah utama. Kondisi ini merepresentasikan asumsi fondasi cukup kaku terhadap rotasi dasar. Interaksi tanah-struktur tidak dimasukkan dalam model karena penelitian difokuskan pada implikasi variasi bentuk kolom terhadap sistem rangka atas. Walaupun demikian, dalam penerapan desain aktual, fleksibilitas fondasi tetap perlu diperhitungkan terutama pada tanah lunak atau tanah urugan.

Pembebanan dan Kombinasi Beban

Beban mati terdiri atas berat sendiri struktur, berat pelat, dinding bata ringan, finishing lantai, plafon, dan utilitas ringan. Beban hidup diambil sesuai fungsi hunian/komersial ringan. Beban gempa dianalisis menggunakan respons spektrum desain berdasarkan SNI 1726:2019 untuk wilayah Denpasar dengan asumsi kelas situs SD. Nilai parameter spektral dalam penelitian ini digunakan sebagai input model simulasi dan perlu disesuaikan kembali dengan koordinat aktual bangunan pada tahap desain.

Tabel 3.4 Beban Gravitasi Model

Jenis Beban	Nilai
Berat sendiri beton	Dihitung otomatis program
Beban finishing lantai	1,00 kN/m ²
Beban plafon dan instalasi	0,25 kN/m ²
Beban dinding ekuivalen	7,50 kN/m pada balok tepi tertentu
Beban hidup lantai hunian/komersial kecil	2,50 kN/m ²
Beban hidup atap	1,00 kN/m ²

Sumber: SNI 1727:2020 dan asumsi model penelitian

Kombinasi beban utama yang digunakan adalah kombinasi kekuatan untuk desain elemen dan kombinasi gempa untuk evaluasi drift. Secara umum kombinasi mengacu pada format:

$$1,4D; \quad 1,2D + 1,6L; \quad 1,2D + 1,0E + L; \quad 0,9D \pm 1,0E$$

Analisis Respons Spektrum

Analisis respons spektrum dilakukan untuk memperoleh periode getar, gaya geser dasar, perpindahan lateral, dan simpangan antar tingkat. Jumlah mode getar diambil sampai partisipasi massa kumulatif minimal 90% pada masing-masing arah utama. Skala gaya gempa diperiksa agar memenuhi ketentuan minimum geser dasar sesuai prinsip SNI 1726:2019.

Analisis Pushover

Analisis pushover dilakukan pada arah X dan arah Y. Beban lateral diberikan secara bertahap mengikuti pola distribusi gaya statik ekuivalen. Sendi plastis pada balok didefinisikan sebagai M3 hinge, sedangkan pada kolom digunakan P-M2-M3 hinge. Titik kontrol perpindahan diambil pada pusat massa atap. Kriteria kinerja dievaluasi secara kualitatif berdasarkan urutan terbentuknya sendi plastis, bentuk kurva kapasitas, dan kondisi elemen pada saat perpindahan target.

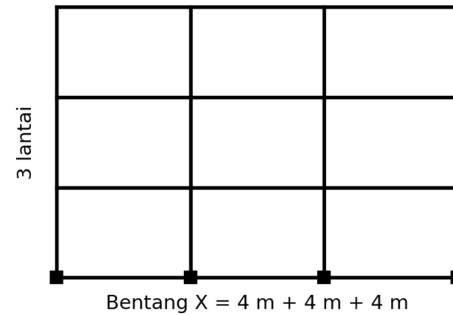
Validasi Model dan Konvergensi

Validasi model dilakukan dengan tiga cara. Pertama, periode fundamental hasil analisis dibandingkan dengan estimasi empiris periode pendekatan. Kedua, berat seismik total diperiksa terhadap rekapitulasi beban mati dan sebagian beban hidup yang berkontribusi. Ketiga, dilakukan studi konvergensi terhadap segmentasi elemen. Hasil validasi menunjukkan bahwa model numerik cukup konsisten untuk digunakan sebagai dasar perbandingan antarvariasi.

Tabel 3.5 Hasil Uji Konvergensi Segmentasi Elemen pada Model M-3

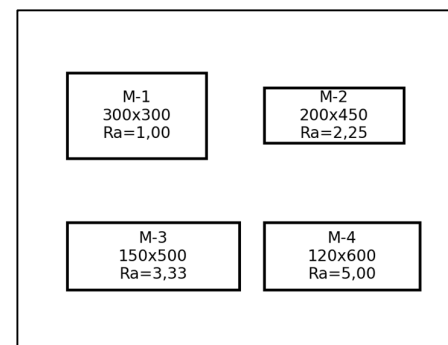
Segmentasi Elemen	Perpindahan Atap Arah Y	Selisih terhadap 8 Segmen
2 segmen	43,8 mm	5,3%
4 segmen	45,0 mm	2,6%
8 segmen	46,2 mm	0,0%

Sumber: Hasil analisis FEM 2026



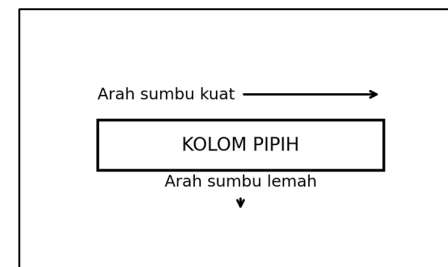
Gambar 3.1 Skema Model Struktur Bangunan 3 Lantai

Sumber: Model penelitian 2026



Gambar 3.2 Variasi Penampang Kolom yang Dianalisis

Sumber: Model penelitian, 2026



Gambar 3.3 Orientasi Sumbu Kuat dan Sumbu Lemah Kolom Pipih

Sumber: Hasil interpretasi model penelitian, 2026

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Periode Getar Struktur

Hasil analisis modal menunjukkan bahwa perubahan bentuk kolom memengaruhi periode getar struktur, terutama pada arah lemah kolom. Pada model kontrol M-1, periode fundamental arah X dan Y relatif berdekatan. Setelah kolom dibuat semakin pipih, periode pada arah lemah meningkat karena kekakuan lateral efektif berkurang. Hal ini menunjukkan bahwa luas penampang yang sama belum tentu menghasilkan

perilaku lateral yang sama apabila distribusi dimensi penampang berubah secara ekstrem.

Tabel 4.1 Periode Fundamental Struktur

Model	Rasio Aspek Kolom	T arah X	T arah Y	Keterangan Dominan
M-1	1,00	0,462 s	0,478 s	Stabil dua arah
M-2	2,25	0,481 s	0,526 s	Arah Y mulai fleksibel
M-3	3,33	0,503 s	0,573 s	Fleksibilitas arah lemah meningkat
M-4	5,00	0,528 s	0,631 s	Arah lemah dominan

Sumber: Hasil analisis FEM dengan Robot Structural Analysis, 2026

Dari Tabel 4.1 terlihat bahwa periode arah Y pada model M-4 meningkat sekitar 32,0% dibanding M-1. Kenaikan ini cukup besar untuk bangunan tiga lantai. Dalam konteks bangunan di Bali yang sering memiliki denah terbuka pada lantai dasar untuk parkir, toko, atau lobi vila, peningkatan periode ini dapat memperbesar perpindahan lateral apabila tidak diimbangi dengan sistem penahan lateral tambahan.

Gaya Geser Dasar

Gaya geser dasar hasil analisis respons spektrum menunjukkan perubahan yang tidak terlalu linier terhadap rasio aspek kolom. Model yang lebih fleksibel cenderung memiliki respons spektral yang berbeda, tetapi pada saat yang sama distribusi gaya dalam menjadi lebih tidak merata. Oleh karena itu, penurunan gaya geser dasar tidak boleh langsung ditafsirkan sebagai kondisi lebih aman.

Tabel 4.2 Gaya Geser Dasar Hasil Analisis Respons Spektrum

Model	Vx	Vy	Perubahan Vy terhadap M-1
M-1	612 kN	598 kN	0,0%
M-2	604 kN	572 kN	-4,3%
M-3	591 kN	548 kN	-8,4%
M-4	576 kN	521 kN	-12,9%

Sumber: Hasil analisis FEM dengan Robot Structural Analysis, 2026

Penurunan Vy pada model M-4 terutama disebabkan oleh meningkatnya periode struktur. Namun demikian, simpangan lateral justru meningkat. Kondisi ini memperlihatkan bahwa evaluasi keamanan struktur tidak cukup hanya dengan membandingkan gaya geser dasar. Parameter deformasi dan kapasitas elemen harus dilihat secara bersamaan.

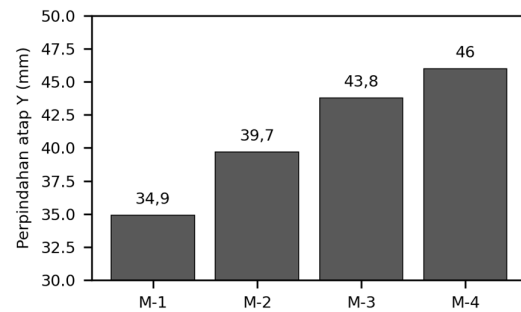
Simpangan Antar Tingkat

Perpindahan atap menjadi indikator awal fleksibilitas global struktur. Hasil analisis menunjukkan bahwa kolom pipih menghasilkan peningkatan perpindahan yang jelas pada arah lemah. Pada arah kuat, peningkatan perpindahan masih relatif terbatas, tetapi pada arah lemah menjadi cukup signifikan.

Tabel 4.3 Perpindahan Atap Maksimum

Model	Δ atap arah X	Δ atap arah Y	Kenaikan ΔY terhadap M-1
M-1	31,6 mm	34,9 mm	0,0%
M-2	33,8 mm	39,7 mm	13,8%
M-3	36,5 mm	43,8 mm	25,5%
M-4	39,2 mm	46,0 mm	31,8%

Sumber: Hasil analisis FEM dengan Robot Structural Analysis, 2026



Gambar 4.1 Diagram Perpindahan Atap Model M-1 sampai M-4

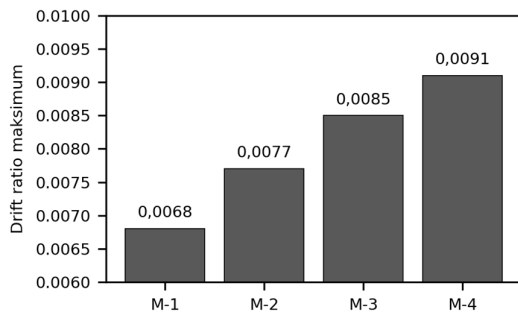
Sumber: Hasil analisis, 2026

Simpangan antar tingkat maksimum terjadi pada lantai dasar untuk semua model, terutama pada arah Y. Hal ini wajar karena lantai dasar memiliki tinggi tingkat lebih besar dan menerima akumulasi gaya geser dari lantai di atasnya. Namun, pada model kolom pipih, konsentrasi drift di lantai dasar tampak lebih kuat.

Tabel 4.4 Simpangan Antar Tingkat Maksimum Arah Y

Model	Lantai 1	Lantai 2	Lantai 3	Drift Maksimum
M-1	0,0068	0,0054	0,0036	0,0068
M-2	0,0077	0,0061	0,0040	0,0077
M-3	0,0085	0,0068	0,0043	0,0085
M-4	0,0091	0,0072	0,0046	0,0091

Sumber: Hasil analisis, 2026



Gambar 4.2 Diagram Simpangan Antar Tingkat Arah Y
Sumber: Hasil analisis, 2026

Dari hasil tersebut terlihat bahwa kolom pipih meningkatkan drift lantai dasar. Pada bangunan aktual, hal ini dapat berimplikasi pada terjadinya retak dinding, kerusakan sambungan balok-kolom, dan rasa tidak nyaman penghuni saat gempa sedang hingga kuat.

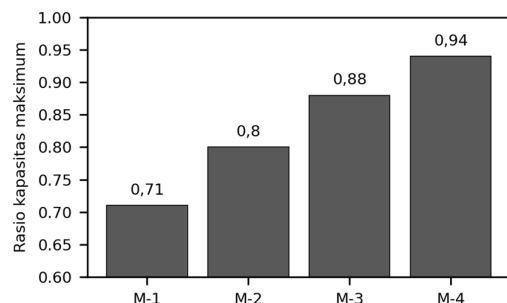
Rasio Kapasitas Elemen Kolom

Rasio kapasitas digunakan untuk melihat seberapa besar tuntutan gaya dalam terhadap kapasitas elemen. Nilai yang semakin mendekati 1,0 menunjukkan bahwa elemen bekerja semakin dekat dengan batas kapasitasnya. Pada penelitian ini, perhatian diberikan pada kolom lantai dasar karena elemen tersebut paling kritis terhadap kombinasi gaya aksial dan momen akibat gempa.

Tabel 4.5 Rasio Kapasitas Maksimum Kolom Lantai Dasar

Model	Arah Kuat	Arah Lemah	Rasio Kapasitas Maksimum
M-1	0,68	0,71	0,71
M-2	0,72	0,80	0,80
M-3	0,76	0,88	0,88
M-4	0,79	0,94	0,94

Sumber: Hasil analisis, 2026



Gambar 4.3 Diagram Rasio Kapasitas Maksimum Kolom Lantai Dasar

Sumber: Hasil analisis, 2026

Model M-4 menunjukkan rasio kapasitas maksimum 0,94 pada arah lemah. Angka ini belum melampaui kapasitas, tetapi cadangan kekuatannya sudah kecil. Dalam pekerjaan lapangan, variasi mutu beton, ketidaktepatan posisi tulangan, selimut beton yang kurang, serta pengecoran yang tidak padat dapat menurunkan kapasitas aktual. Oleh karena itu, rasio 0,94 pada model ideal patut dibaca sebagai tanda peringatan, bukan sekadar angka aman.

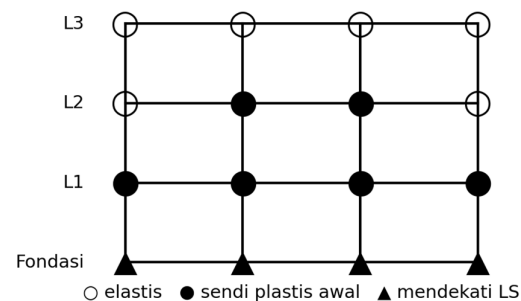
Distribusi Sendi Plastis

Analisis pushover memperlihatkan perbedaan mekanisme plastifikasi antar model. Pada model M-1, sendi plastis awal lebih banyak terjadi pada ujung balok lantai 1 dan lantai 2. Kondisi ini masih mendekati prinsip balok-lemah kolom-kuat. Pada model M-3 dan M-4, sendi plastis mulai muncul pada kolom lantai dasar arah lemah pada tahap perpindahan yang lebih awal. Ini menunjukkan bahwa kolom pipih dapat menggeser mekanisme kerusakan dari balok menuju kolom.

Tabel 4.6 Urutan Terbentuknya Sendi Plastis pada Analisis Pushover Arah Y

Model	Sendi Plastis Awal	Kondisi pada Perpindahan Target	Catatan Mekanisme
M-1	Balok lantai 1	Mayoritas balok IO-LS	Mekanisme relatif baik
M-2	Balok lantai 1 dan 2	Beberapa balok LS	Masih dapat diterima
M-3	Balok dan sebagian kolom dasar	Kolom dasar mulai IO-LS	Perlu pengendalian desain
M-4	Kolom dasar arah lemah	Beberapa kolom mendekati LS	Risiko mekanisme lantai lunak

Sumber: Hasil analisis, 2026



Gambar 4.4 Pola Sendi Plastis Model M-4 pada Pushover Arah Y

Hasil simulasi tersebut memperlihatkan bahwa masalah utama kolom pipih bukan hanya berkurangnya kekakuan, tetapi juga berubahnya lokasi kerusakan. Pada wilayah gempa tinggi, perubahan lokasi kerusakan dari balok ke kolom merupakan hal yang perlu dihindari. Struktur mungkin masih memenuhi kekuatan nominal, tetapi kinerja seismiknya dapat menurun karena daktilitas sistem tidak berkembang secara merata.

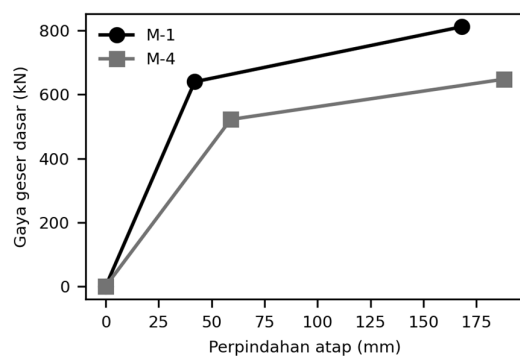
Kurva Kapasitas Pushover

Kurva kapasitas menunjukkan hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan atap. Model M-1 memiliki kapasitas lateral dan kekakuan awal yang lebih seimbang. Model M-4 memperlihatkan kekakuan awal arah Y lebih rendah dan penurunan kekakuan pascayield lebih cepat.

Tabel 4.7 Parameter Kurva Kapasitas Pushover Arah Y

Model	V _y Yield	Δ_y	V Maksimum	Δ_u	Daktilitas Global
M-1	640 kN	42 mm	812 kN	168 mm	4,00
M-2	604 kN	47 mm	765 kN	176 mm	3,74
M-3	568 kN	52 mm	706 kN	181 mm	3,48
M-4	522 kN	59 mm	648 kN	188 mm	3,19

Sumber: Hasil analisis, 2026



Gambar 4.5 Kurva Kapasitas Pushover Arah Y
Sumber: Hasil analisis, 2026

Terlihat bahwa daktilitas global menurun dari 4,00 pada model M-1 menjadi 3,19 pada model M-4. Penurunan daktilitas ini cukup penting karena bangunan tahan gempa tidak hanya mengandalkan kekuatan elastis, tetapi juga kemampuan berdeformasi inelastik secara stabil. Dengan kata lain, kolom pipih dapat membuat struktur tampak efisien secara ruang, tetapi menyimpan konsekuensi terhadap daktilitas struktur.

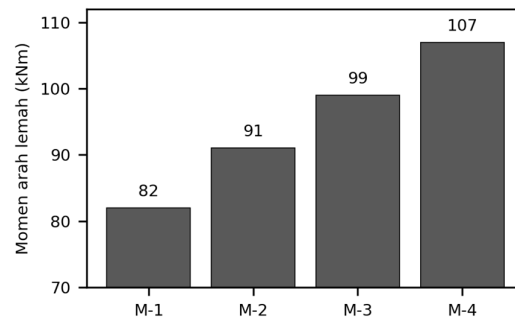
Tegangan dan Konsentrasi Gaya Dalam

Pada model kolom pipih, distribusi momen lentur tidak merata antara arah kuat dan arah lemah. Kolom dengan dimensi pendek 120 mm menunjukkan konsentrasi momen pada sumbu lemah yang lebih kritis. Selain itu, rasio tulangan dan jarak sengkang menjadi lebih sensitif karena ruang penempatan tulangan pada dimensi pendek terbatas. Dalam praktik pengecoran, kolom yang terlalu tipis juga lebih rentan mengalami honeycomb apabila agregat maksimum, jarak tulangan, dan vibrator tidak dikendalikan dengan baik.

Tabel 4.8 Momen Maksimum Kolom Lantai Dasar Arah Lemah

Model	Momen Maksimum	Kenaikan terhadap M-1	Lokasi Kritis
M-1	82 kNm	0,0%	Kolom tepi lantai dasar
M-2	91 kNm	11,0%	Kolom tepi lantai dasar
M-3	99 kNm	20,7%	Kolom sudut lantai dasar
M-4	107 kNm	30,5%	Kolom sudut lantai dasar

Sumber: Hasil analisis, 2026



Gambar 4.6 Diagram Kenaikan Momen Kolom Lantai Dasar Arah Lemah
Sumber: Hasil analisis, 2026

Pembahasan

Dalam konteks bangunan di Bali yang berada dalam zona gempa yang cukup tinggi, penggunaan kolom pipih perlu ditempatkan secara hati-hati. Banyak bangunan bertingkat rendah memiliki keterbatasan lahan, kebutuhan ruang terbuka, dan tuntutan estetika arsitektur. Kolom pipih memang memberi keuntungan arsitektural. Akan tetapi, keuntungan tersebut tidak boleh mengorbankan mekanisme struktur. Apabila kolom pipih dipakai secara berulang pada satu arah tanpa elemen penahan lateral lain, bangunan dapat menjadi terlalu fleksibel pada arah tegak lurus bidang kolom.

Diluar batasan yang diberikan oleh SNI 2847:2019, Pasal 18.7.2.1, penggunaan kolom pipih memerlukan terpenuhinya beberapa pertimbangan. Pertama, rasio aspek tidak terlalu besar, terutama untuk kolom utama lantai dasar. Kedua, orientasi kolom harus disusun secara seimbang pada dua arah bangunan. Ketiga, detailing penulangan pada daerah sendi plastis harus dibuat lebih ketat dan mengikuti ketentuan sistem rangka pemikul momen khusus. Keempat, bangunan perlu dianalisis tiga dimensi, bukan hanya dihitung sebagai portal dua dimensi pada satu arah yang dianggap paling kuat. Kelima, apabila tuntutan arsitektur tetap menghendaki kolom sangat pipih, perlu dipertimbangkan tambahan dinding geser, core tangga, atau sistem pengaku lain yang direncanakan secara menyatu.

Hasil penelitian ini sejalan dengan prinsip umum desain tahan gempa bahwa keteraturan, kekakuan dua arah, dan mekanisme keruntuhan yang terkendali lebih penting daripada sekadar memenuhi luas penampang nominal. Pada kolom pipih, luas beton dapat terlihat cukup, tetapi distribusi kekakuan dan kapasitas lenturnya tidak seimbang. Di sinilah letak persoalan yang sering tidak terlihat pada tahap desain awal.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi numerik dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut.

1. Penggunaan kolom pipih pada bangunan beton bertulang bertingkat rendah meningkatkan fleksibilitas struktur pada arah lemah kolom. Pada model kolom 120 mm × 600 mm, periode fundamental arah Y meningkat sekitar 32,0% dibanding model kolom 300 mm × 300 mm.
2. Perpindahan atap dan simpangan antar tingkat meningkat seiring bertambahnya rasio aspek kolom. Model M-4 menghasilkan perpindahan atap arah Y sebesar 46,0 mm atau meningkat sekitar 31,8% dibanding model kontrol.
3. Rasio kapasitas kolom lantai dasar meningkat cukup signifikan pada arah lemah. Model M-4 menunjukkan rasio kapasitas maksimum 0,94, sehingga cadangan kapasitasnya relatif kecil apabila dibandingkan dengan model kolom normal.
4. Analisis pushover menunjukkan bahwa kolom pipih dengan rasio aspek tinggi cenderung mempercepat terbentuknya sendi plastis pada kolom lantai dasar arah lemah. Hal ini menunjukkan potensi pergeseran mekanisme dari balok-lemah kolom-kuat menuju mekanisme yang lebih berisiko terhadap lantai lunak.
5. Penggunaan kolom pipih pada bangunan bertingkat rendah di wilayah gempa tinggi, harus dibatasi dan dianalisis secara eksplisit. Rasio aspek yang terlalu besar, khususnya pada kolom utama lantai dasar, sebaiknya dihindari kecuali tersedia sistem penahan lateral tambahan.

6. SARAN

1. Perencana struktur sebaiknya tidak hanya menyamakan luas penampang kolom pipih dengan kolom normal, tetapi juga memeriksa kekakuan, kapasitas lentur dua arah, rasio kapasitas, dan drift antar tingkat.
2. Untuk bangunan di wilayah gempa tinggi seperti Bali, orientasi kolom pipih perlu disusun seimbang pada dua arah utama bangunan agar tidak terjadi kelemahan lateral pada satu arah.
3. Kolom pipih dengan dimensi pendek sangat kecil perlu diberi detailing sengkang yang lebih rapat, terutama pada daerah ujung kolom, joint balok-kolom, dan lantai dasar.
4. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan analisis nonlinear time history dengan beberapa rekaman gempa yang telah diskalakan, serta memodelkan joint balok-kolom dan interaksi tanah-struktur secara lebih rinci.
5. Validasi eksperimental terhadap spesimen kolom pipih beton bertulang lokal perlu dilakukan untuk memperoleh hubungan beban-deformasi, pola retak, daktilitas, dan degradasi kekakuan yang lebih representatif terhadap kondisi material serta mutu pelaksanaan di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 318. (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary. American Concrete Institute.
- American Society of Civil Engineers. (2017). ASCE/SEI 41-17: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. ASCE.
- American Society of Civil Engineers. (2016). ASCE/SEI 7-16: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. ASCE.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung. BSN, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan. BSN, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). SNI 1727:2020 Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain. BSN, Jakarta.
- Chopra, A. K. (2017). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. Pearson.
- Autodesk. (2026). Robot Structural Analysis Professional: User Guide and Structural Analysis Documentation. Autodesk, San Francisco.
- FEMA. (2000). FEMA 356: Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- FEMA. (2009). FEMA P-695: Quantification of Building Seismic Performance Factors. Federal

- Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- Imran, I., & Hendrik, F. (2016). *Perencanaan Lanjut Struktur Beton Bertulang*. ITB Press, Bandung.
- Kappos, A. J. (2018). *Seismic Design and Assessment of Bridges and Buildings*. Springer.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Pusat Studi Gempa Nasional, Bandung.
- Moehle, J. P. (2015). *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*. McGraw-Hill Education.
- Paulay, T., & Priestley, M. J. N. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. John Wiley & Sons.
- Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., & Kowalsky, M. J. (2007). *Displacement-Based Seismic Design of Structures*. IUSS Press.
- Sodik, A. S. N., Tavio, & Raka, I. G. P. (2021). Pengaruh Penerapan SNI 1726:2019 terhadap Desain Struktur Beton Bertulang. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 17(2), 89–101.
- Tavio, & Kusuma, B. (2009). *Desain Sistem Rangka Pemikul Momen dan Dinding Struktur Beton Bertulang Tahan Gempa*. ITS Press, Surabaya.
- Tavio, Wimbadi, I., & Raka, I. G. P. (2018). Studi perilaku seismik struktur beton bertulang melalui pendekatan desain kapasitas. *Jurnal Teknik Sipil*, 25(1), 1–10.
- Wight, J. K. (2016). *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*. Pearson.
- Wijaya, M. N., Dwijendra, N. K. A., & Yasa, I. M. A. (2020). Karakteristik bangunan hunian bertingkat rendah di kawasan perkotaan Bali dan implikasinya terhadap tata ruang. *Jurnal Arsitektur*, 10(2), 75–84.
- Yuliari, I. G. A. A. D., Satyarno, I., & Saputra, A. (2022). Evaluasi kinerja seismik bangunan beton bertulang menggunakan analisis pushover berdasarkan SNI 1726:2019. *Jurnal Teknik Sipil*, 29(3), 221–232.
- Zhang, Y., Li, B., & Pan, T. C. (2020). Seismic behavior and design consideration of reinforced concrete columns under bidirectional lateral loading. *Engineering Structures*, 212, 110497.
- Zhou, X., Liu, J., & Wang, Z. (2021). Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete frame structures subjected to earthquake loading. *Structures*, 33, 4087–4101.
- Zhu, L., Elwood, K. J., & Haukaas, T. (2019). Classification and seismic performance assessment of reinforced concrete frame buildings. *Earthquake Spectra*, 35(2), 781–804.