

Evaluasi Kinerja Kolom Beton Bertulang dengan Tulangan Spiral Menggunakan Analisis Pushover Statik Nonlinier

Jamaluddin Bangki¹, Herman Parung¹, Muhammad Akbar Caronge^{1*}

¹Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Gowa 92171, Sulawesi Selatan, INDONESIA

*Corresponding author: ma-caronge@unhas.ac.id

INTISARI

Kolom beton bertulang adalah elemen struktural vertikal utama yang keruntuhannya dapat memicu kegagalan total pada bangunan. Penelitian ini mengevaluasi kinerja kolom tunggal beton bertulang dengan pengekangan tulangan spiral terhadap beban lateral menggunakan metode analisis pushover statik nonlinier. Evaluasi tingkat kinerja struktur didasarkan pada metode koefisien perpindahan sesuai pedoman FEMA 356. Pemodelan dan simulasi numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak SAP2000 berdasarkan data sekunder eksperimental kolom berdiameter 340 mm dan tinggi 1465 mm. Hasil analisis menunjukkan bahwa kolom mampu menahan gaya geser dasar maksimum sebesar 76,591 kN pada perpindahan 29,96 mm. Berdasarkan evaluasi FEMA 356, drift aktual kolom adalah 0,001979%, yang menempatkan struktur pada tingkat kinerja *Immediate Occupancy* (IO). Analisis distribusi sendi plastis menunjukkan bahwa pelelehan terkonsentrasi pada area tumpuan bawah kolom, berkembang dari batas linier hingga mencapai batas maksimum gaya geser (titik C) pada tahap akhir pembebanan.

Kata kunci: kolom beton bertulang, tulangan spiral, analisis pushover, FEMA 356, sendi plastis.

1. PENDAHULUAN

Gempa bumi merupakan salah satu kejadian alam yang berpotensi menimbulkan kerusakan serius pada bangunan. Oleh sebab itu, struktur bangunan perlu dirancang dengan kapasitas seismik yang memadai agar mampu menahan gaya lateral akibat gempa tanpa mengalami kegagalan secara tiba-tiba. Dalam perencanaan struktur tahan gempa, salah satu konsep utama yang harus diperhatikan adalah daktilitas. Daktilitas menggambarkan kemampuan struktur untuk mengalami deformasi yang cukup besar setelah melewati batas elastis, namun tetap mampu mempertahankan kapasitas kekuatannya tanpa mengalami penurunan yang signifikan.

Kolom beton bertulang merupakan elemen struktural vertikal yang berfungsi menahan beban aksial serta berperan penting dalam menjaga kestabilan keseluruhan sistem struktur (Dewi dkk., 2024). Kerusakan yang terjadi pada elemen kolom dapat memicu kegagalan struktur secara menyeluruh. Oleh karena itu, peningkatan kemampuan deformasi kolom menjadi aspek yang sangat penting dalam perencanaan struktur tahan gempa.

Dalam mengevaluasi kinerja struktur terhadap pengaruh gempa, salah satu metode analisis yang banyak digunakan adalah analisis pushover statik nonlinier (Wiryadi dkk., 2022; Belhocine dkk., 2024). Metode ini dilakukan dengan memberikan beban lateral secara bertahap pada struktur hingga mencapai kondisi inelastis, sehingga perilaku struktur setelah melewati batas elastis dapat dipelajari dengan lebih realistis (Darmansyah dkk., 2024). Hasil dari analisis pushover umumnya disajikan dalam bentuk kurva kapasitas yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dan perpindahan lateral (*displacement*) pada titik kontrol struktur (Kuria dkk., 2023).

Walaupun analisis pushover telah banyak diterapkan dalam penelitian rekayasa kegempaan, sebagian besar studi masih berfokus pada evaluasi kinerja global bangunan bertingkat. Penelitian yang secara khusus membahas perilaku elemen kolom beton bertulang tunggal dengan pengekangan tulangan spiral masih tergolong terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja kolom beton bertulang dengan tulangan spiral melalui analisis pushover statik nonlinier menggunakan perangkat lunak SAP2000, serta menilai tingkat kinerja struktur berdasarkan pedoman FEMA 356.

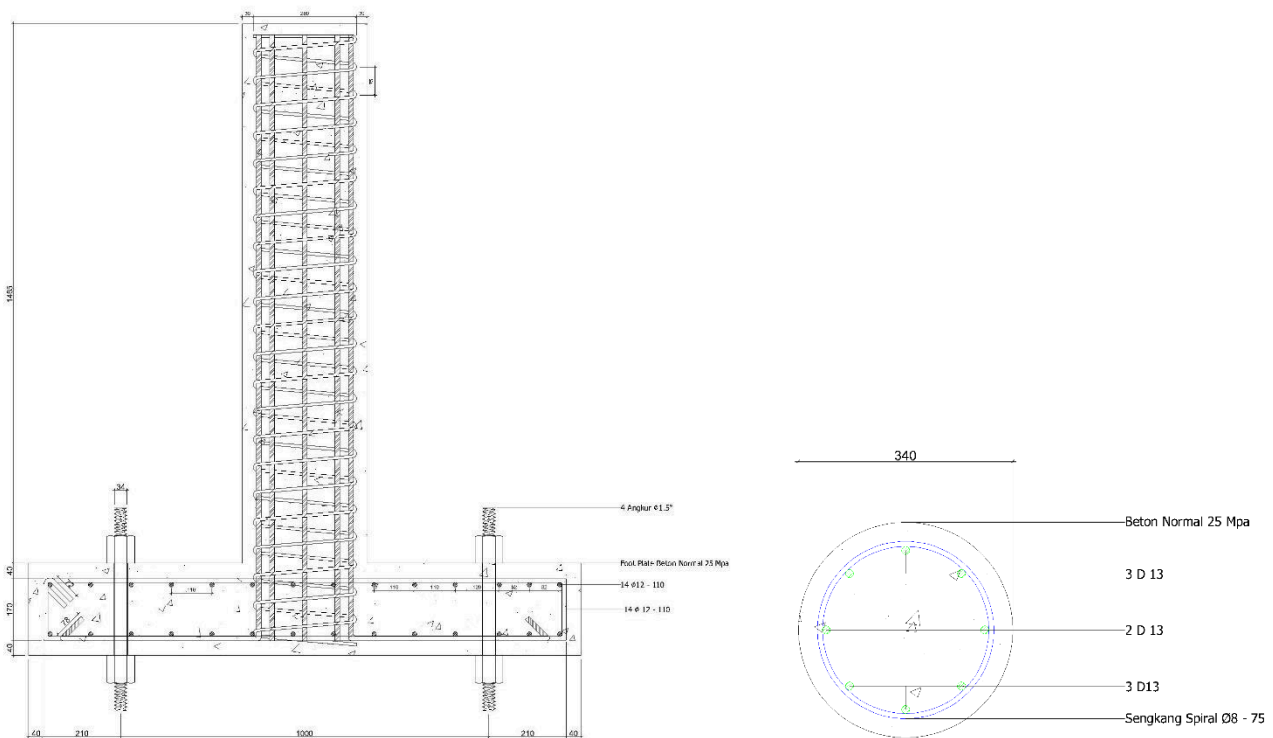
2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui simulasi numerik berbasis Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*). Objek studi adalah spesimen kolom beton bertulang tunggal dengan tulangan spiral yang

dianalisis menggunakan perangkat lunak SAP2000. Data sekunder yang digunakan berasal dari studi eksperimental di laboratorium, mencakup kolom dengan tinggi 1465 mm, diameter 340 mm, mutu beton 25 MPa, tulangan longitudinal 8D13 ($f_y = 420$ MPa), dan sengkang spiral Ø8-75 ($f_y = 280$ MPa).

Gambar 1 menunjukkan skema dan pemodelan struktur, kondisi batas berupa tumpuan jepit pada dasar (*fixed support*). Pemodelan meliputi definisi material, penampang, dan pembebanan gravitasi statik linier yang dilanjutkan dengan beban dorong lateral bertahap (*Pushover X* dan *Pushover Y*) dengan metode kontrol perpindahan (*Displacement Control*). Sendi plastis (*plastic hinges*) didefinisikan secara otomatis sesuai Tabel 6-8 FEMA 356 untuk kolom beton bertulang, diletakkan pada jarak relatif 0,05 dan 0,95 dari panjang elemen.

Penelitian ini menggunakan *random specimen* berbasis data eksperimen. Pemilihan dimensi dan konfigurasi tulangan didasarkan pada parameter representatif kolom beton bertulang: rasio kelangsingan (L/D) sebesar 4,3 yang mengindikasikan kolom pendek, rasio tulangan longitudinal ($\rho = 1,2\%$), serta jarak sengkang spiral 75 mm yang menghasilkan *confinement* efektif. Parameter ini dipilih untuk memastikan terjadinya respons nonlinier yang signifikan dan perilaku kegagalan yang realistis pada analisis pushover.



Gambar 1. Skema dan pemodelan struktur.

Penentuan level kinerja dilakukan dengan Metode Koefisien Perpindahan FEMA 356 untuk mencari Target Perpindahan (δ_T) menggunakan persamaan berikut:

$$\delta_T = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \left(\frac{T_e}{2\pi} \right)^2 g \tag{1}$$

Berdasarkan Persamaan (1), T_e merupakan waktu getar alami efektif yang telah mempertimbangkan kondisi inelastis pada struktur. C_0 adalah faktor modifikasi yang menghubungkan perpindahan spektral pada sistem *Single Degree of Freedom* (SDOF) ekuivalen dengan perpindahan atap pada sistem bangunan *Multiple Degrees of Freedom* (MDOF). Selanjutnya, C_1 merupakan faktor modifikasi yang digunakan untuk menghubungkan perpindahan inelastis maksimum dengan perpindahan yang diperoleh dari respons elastis linear. C_2 adalah faktor modifikasi yang memperhitungkan efek *pinching* pada hubungan beban–deformasi akibat degradasi kekakuan dan kekuatan maksimum struktur. Sementara itu, C_3 merupakan faktor modifikasi yang digunakan untuk

memperhitungkan peningkatan perpindahan lateral yang disebabkan oleh efek $P-\Delta$ (P-delta). S_a menyatakan respons spektrum percepatan desain, sedangkan g merupakan percepatan gravitasi dengan nilai sebesar $9,81 \text{ m/det}^2$.

Nilai *drift* aktual kemudian dihitung dari rasio perpindahan target terhadap tinggi total kolom dan dibandingkan dengan batas penerimaan FEMA 356.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kurva Kapasitas Kolom

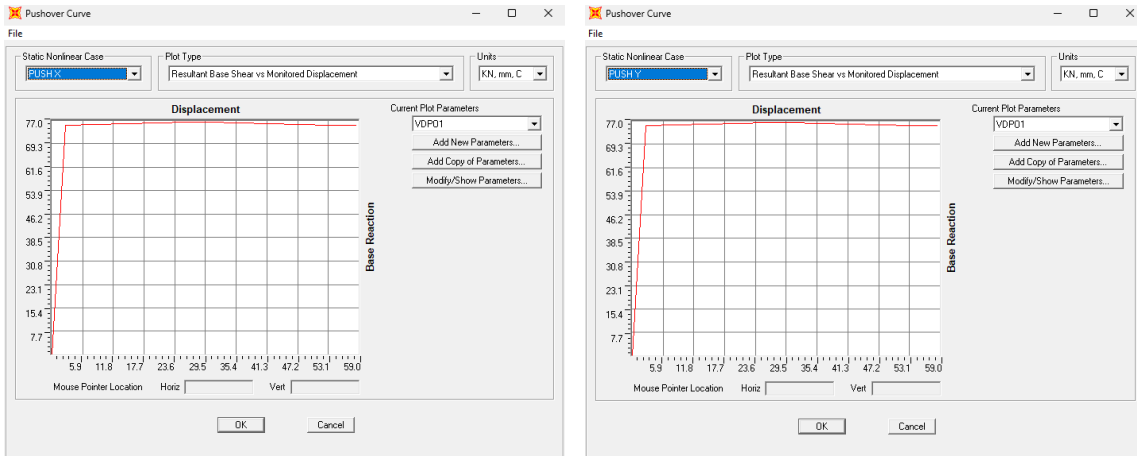
Analisis *pushover* statik nonlinier digunakan untuk memperoleh hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dan perpindahan lateral (*displacement*) pada kolom beton bertulang yang menggunakan tulangan spiral diperlihatkan pada Tabel 1. Dalam analisis ini, beban lateral diberikan secara bertahap hingga struktur mencapai kondisi inelastis. Dari proses tersebut diperoleh kurva kapasitas yang menggambarkan respons struktur mulai dari kondisi elastis hingga mendekati batas keruntuhan.

Kurva kapasitas diperlihatkan pada Gambar 2. Kurva kapasitas menjadi salah satu parameter penting dalam mengevaluasi perilaku struktur terhadap pengaruh gempa. Pada tahap awal pembebanan, kurva memperlihatkan hubungan yang bersifat linier antara gaya geser dan perpindahan, yang menunjukkan bahwa struktur masih berada dalam kondisi elastis. Setelah melewati titik leleh (*yield point*), kekakuan struktur mulai berkurang yang ditunjukkan oleh perubahan kemiringan kurva. Hal ini mengindikasikan bahwa elemen kolom mulai mengalami deformasi plastis akibat meningkatnya beban lateral yang bekerja pada struktur (Raudah dkk., 2025).

Hasil analisis *pushover* pada program SAP2000 menunjukkan hubungan perpindahan kontrol terhadap gaya geser dasar seperti terlihat pada Tabel 1. Gaya lateral maksimum yang mampu ditahan oleh kolom beton bertulang pada arah X maupun arah Y adalah sebesar 76,591 kN. Beban puncak ini dicapai pada tahapan ke-6 (*step 6*) dengan perpindahan lateral sebesar 29,96 mm.

Tabel 1. Data kurva kapasitas *pushover* X dan Y kolom beton bertulang dengan tulangan spiral

Step	<i>Pushover X</i>		<i>Pushover Y</i>	
	<i>Displacement</i> mm	<i>BaseForc</i> <i>e</i> KN	<i>Displacemen</i> <i>t</i> mm	<i>BaseForc</i> <i>e</i> KN
0	0	0	0	0
1	2,637	75,531	2,637	75,531
2	8,497	75,757	8,497	75,757
3	14,357	75,984	14,357	75,984
4	20,217	76,211	20,217	76,211
5	26,077	76,440	26,077	76,44
6	29,960	76,591	29,960	76,591
7	35,820	76,331	35,820	76,331
8	41,680	76,071	41,680	76,071
9	47,540	75,811	47,540	75,811
10	53,400	75,551	53,400	75,551
11	58,600	75,320	58,600	75,320



Gambar 2. Kurva kapasitas pushover kolom arah X (kiri) dan arah Y (kanan).

3.2 Tingkat Kinerja Struktur FEMA 356

Dalam mengklasifikasikan tingkat kinerja struktur, FEMA menerapkan Metode Koefisien Perpindahan sebagaimana pada Gambar 3. Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas, tahapan dalam penerapan metode koefisien perpindahan untuk kolom beton bertulang dengan tulangan spiral dirangkum sebagai berikut.

Berdasarkan Metode Koefisien Perpindahan, diperoleh koefisien $C_0 = 1$, $C_1 = 1$, $C_2 = 1$, $C_3 = 1$, $S_a = 0,525$, dan $T_e = 0,015$ detik. Maka perhitungan Target perpindahan (δ_T) adalah sebagai berikut.

- Perhitungan Arah X dan Y Kolom Beton Bertulang dengan Tulangan Spiral
 - a. Arah X

$$\delta_T = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \left(\frac{T_e}{2\pi}\right)^2 g$$

$$= 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0,525 \left(\frac{0,015}{2\pi}\right)^2 \times 9,8$$

$$= 0,0000293 \text{ m} = 0,0293 \text{ mm}$$

$$Drift Ratio = \frac{\delta_T}{H_{total}} = \frac{0,0293}{1465} = 0,00001979 \text{ (0,001979 \%)}$$

- b. Arah Y

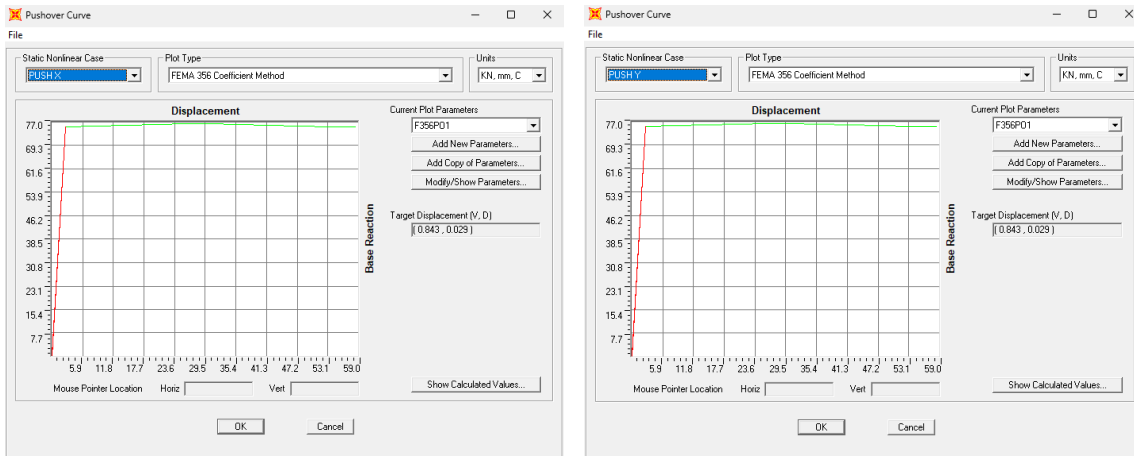
$$\delta_T = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \left(\frac{T_e}{2\pi}\right)^2 g$$

$$= 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0,525 \left(\frac{0,015}{2\pi}\right)^2 \times 9,8$$

$$= 0,0000293 \text{ m} = 0,0293 \text{ mm}$$

$$Drift Ratio = \frac{\delta_T}{H_{total}} = \frac{0,0293}{1465} = 0,00001979 \text{ (0,001979 \%)}$$

Target perpindahan (δ_T) yang didapatkan adalah 0,0293 mm untuk kedua arah. Nilai simpangan (*drift ratio*) kolom adalah 0,001979%.



Gambar 3. Kurva FEMA 356 pushover kolom arah X (kiri) dan arah Y (kanan).

Tabel 2. Batasan simpangan tingkat kinerja struktur berdasarkan FEMA 356

Tingkat Kinerja	Drift Ratio	Keterangan
<i>Immediate Occupancy</i>	1,0	Transient
<i>Life Safety</i>	2,0	Transient
	1,0	<i>Permanent</i>
<i>Collapse Prevention</i>	4,0	Transient atau <i>Permanent</i>

Tabel 3. Tingkat kinerja struktur menurut FEMA 356

Tingkat Kinerja	Deskripsi
<i>Operational</i>	Tidak ada kerusakan pada struktur dan non-struktur, bangunan tetap berfungsi.
<i>Immediate Occupancy (IO)</i>	Tidak terdapat kerusakan yang berarti pada komponen struktural dan non-struktural. Tidak terjadi pergeseran permanen pada bangunan, sedikit retak, serta semua sistem penting pada gedung dapat beroperasi dengan normal.
<i>Life Safety (LS)</i>	Struktur masih mampu menahan beban gempa dengan sedikit kerusakan. Komponen non-struktural masih aman, tetapi terjadi kerusakan pada beberapa utilitas.
<i>Collapse Prevention (CP)</i>	Struktur mengalami kerusakan tetapi belum runtuh. Terjadi perubahan kekakuan struktur. Kecelakaan akibat jatuhnya material sangat mungkin terjadi.

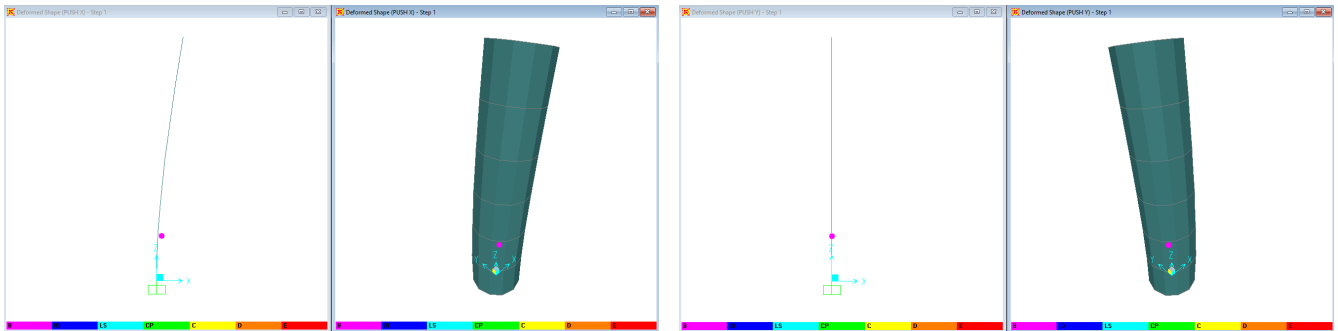
Berdasarkan batasan simpangan pada FEMA 356 dalam Tabel 2, hasil menunjukkan tingkat kinerja *Immediate Occupancy (IO)* sesuai dengan Tabel 3. Hal ini mengindikasikan bahwa struktur mampu menahan beban gempa desain, tetap berada dalam fase pasca-elastik awal (Esskely dkk., 2024; Hwang dkk., 2025), dan mempertahankan kekuatannya tanpa mengancam keselamatan (ASCE FEMA 356, 2000).

3.3 Mekanisme Sendi Plastis

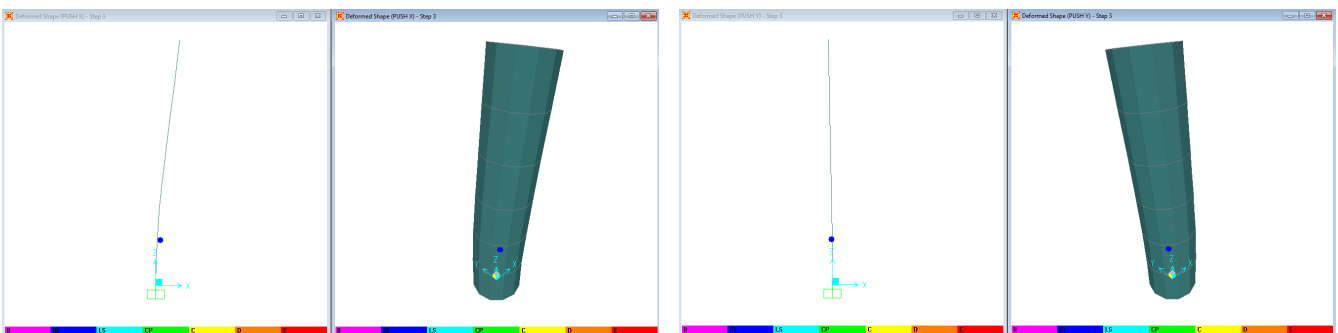
Pembentukan sendi plastis pada arah X dan Y menunjukkan pola yang konsisten, di mana pelelehan terpusat pada tumpuan dasar kolom akibat momen maksimum.

- Gambar 4 menunjukkan leleh pertama. Pelelehan pertama kali terpantau pada tahapan awal (*step* pertama) yang diidentifikasi dengan warna merah muda (B), menandakan kolom mencapai batas linier peluluhan.
- Pada *step* ketiga hingga *step* keempat, status berkembang menjadi biru tua (IO) ditunjukkan pada Gambar 5.
- Pada *step* kelima terlihat pada Gambar 6, warna biru muda (LS) muncul, menandakan dimulainya penurunan kekakuan (*Life Safety*).

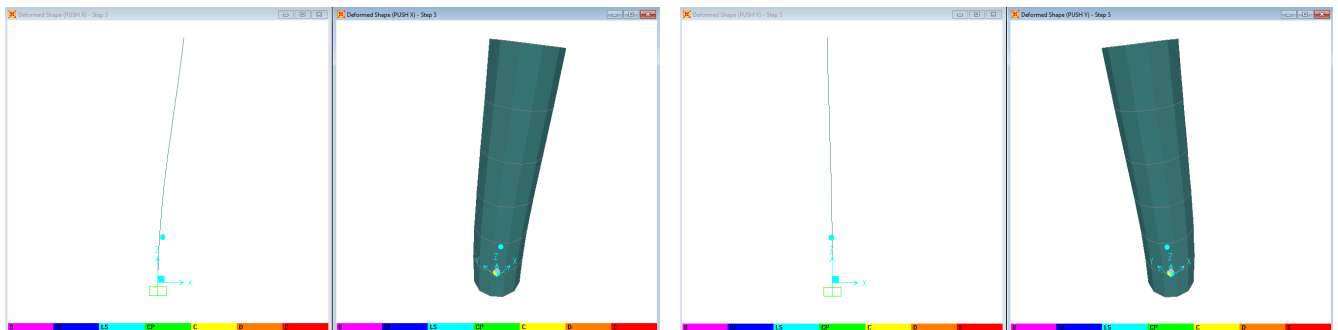
- Pada Gambar 7, degradasi berlanjut secara progresif hingga titik maksimal (*step* kesebelas), di mana sendi plastis berubah warna menjadi kuning (C), yang berarti kolom telah sepenuhnya mencapai batas atas kapasitas gaya gesernya sebelum keruntuhan total.



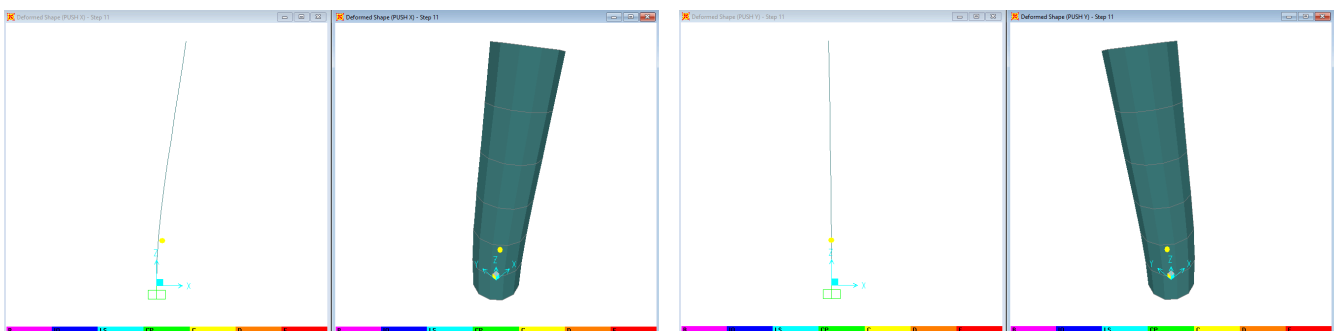
Gambar 4. *Step* pertama terjadinya sendi plastis arah X (kiri), dan arah Y (kanan).



Gambar 5. *Step* ketiga terjadinya sendi plastis arah X (kiri), dan arah Y (kanan).



Gambar 6. *Step* kelima terjadinya sendi plastis arah X (kiri), dan arah Y (kanan).



Gambar 7. *Step* kesebelas terjadinya sendi plastis arah X (kiri), dan arah Y (kanan).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini, disimpulkan bahwa:

1. Kurva kapasitas memperlihatkan bahwa kolom beton bertulang dengan tulangan spiral memiliki perilaku daktail dan dapat memikul gaya geser maksimum 76,591 kN pada perpindahan 29,96 mm.
2. Tingkat kinerja struktur berdasarkan metode koefisien perpindahan FEMA 356 masuk dalam klasifikasi *Immediate Occupancy* (IO) dengan *drift ratio* sebesar 0,001979%.
3. Distribusi sendi plastis terkonsentrasi di *area* tumpuan bawah kolom, berkembang secara sistematis dari titik leleh awal (B) melewati batas keselamatan (LS), hingga mencapai batas akhir daya dukungnya (C) pada pembebanan puncak.

REFERENSI

ASCE, "FEMA 356 – Prestandard And Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Buildings" , Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.,2000.

Belhocine, M., Benyahi, K., Bouafia, Y., Rahmouni, O., and Messas, A. (2024). "Nonlinear Analysis Methods for Reinforced Concrete Structural Elements Subjected to Static and Dynamic Loads." *Journal of Applied Engineering Sciences*, 14(2), 202-211.

Darmansyah, G.P., Maidiawati, M., and Honesti, L. (2024). "Evaluasi Kapasitas Seismik Gedung Beton Bertulang dengan Metode Pushover Analysis." *Jurnal Bangunan, Konstruksi & Desain*, 2(1), 62-70.

Dewi, R., Artana, W., and Laintarawan, I.P. (2024). "Perbandingan Kinerja Struktur Kolom Bulat dan Kolom Persegi Beton Bertulang Terhadap Beban Gempa dengan Analisis Pushover (Studi Kasus: Gedung Balai Diklat Keuangan Denpasar)." *Jurnal Widya Teknik*, 20(1).

Esskely, M., and Bousshine, L. (2024). "Pushover Analysis of Regular Reinforced Concrete Buildings with different column section designs." *International Journal of Plasticity, Damage and Fracture*, 1(2).

Hwang, W.J., and Kim, S.J. (2025). "Predictive Equations for Modeling Shear Behavior in RC Columns with Non-Seismic Details for Enhanced Seismic Performance Assessment." *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(3).

Kuria, K.K., and Keyes-Brassai, O.K. (2023). "Nonlinear Static Analysis for Seismic Evaluation of Existing RC Hospital Building." *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(21).

Raudah, A., Salma, S., Defiana, Y., and Saepudin, U. (2025). "Evaluasi Kinerja Seismik Struktur Baja dengan Metode Pushover Analysis (Studi Kasus Gedung Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Siliwangi Kota Tasikmalaya)." *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 2(2).

Wiryadi, I.G.G., Wirawan, I.P.A.P., Tubuh, I.K.D.K., and Candra, I.M.A. (2022). "Level Kinerja Struktur Gedung Fakultas Pariwisata Universitas Udayana Berdasarkan Fema 356 Dan Atc-40." *Jurnal Teknik Gradien*, 14(1), 25-34.