

Analisis Perilaku Kolom terhadap Beban Aksial dan Torsi dengan Variasi Bentuk Penampang Menggunakan *Finite Element Method* (FEM) pada Mutu Beton, Luas Penampang, dan Luas Tulangan yang Sama

Fitrah Arif Harefa*, Ing Johannes Tarigan, Ika Puji Hastuti

Universitas Sumatera Utara, Indonesia

Email: fithraharifharefa@gmail.com*, johannes.tarigan@usu.ac.id, ika.hastuty@usu.ac.id

Keywords:	Abstract
Column; Axial Load; Torsion; Finite Element Method (FEM); Abaqus	This study aims to analyze the effect of variations in column cross-sectional shapes on the capacity of column structures in a combination of axial and torsional loads, analyze the level of agreement of the results of column interaction diagrams between analytical methods and numerical methods using the Finite Element Method (FEM) in the Abaqus application, and determine the column cross-sectional shape that provides the most optimal structural performance based on axial capacity, torsional capacity, stress distribution, deformation, and damage patterns, with the same material parameters. This study shows that differences in cross-sectional shapes significantly affect the ability of columns to withstand axial loads, moments, and torsions, even though the quality of concrete, cross-sectional size, and amount of reinforcement are kept the same. The axial capacity of the centric load on all column variations is almost the same, which is in the range of 12.06×10^6 N to 12.35×10^6 N. However, in the conditions of compressive and balanced collapse, there are significant differences, namely rectangular columns with a ratio of 1: 4 have the highest axial capacity of 20,168,879 N, while square columns have the lowest capacity of 5,987,336 N. In addition, the largest torsional capacity is obtained in circular columns because the distribution of shear stress is more even and the torsional constant is greater than other cross-sectional shapes. The analysis carried out shows that the numerical method using Abaqus is suitable and in accordance with the analytical method. The P-M interaction diagrams generated from both methods show similar curve patterns, where the points of compressive collapse, balanced collapse, and tensile collapse conditions are in positions that are not much different. Based on the results of the comparison of all structural performance parameters, there is no one cross-section shape that is superior in all loading aspects.
Kata kunci:	Abstrak
Kolom; Beban Aksial; Torsi; <i>Finite Element Methode</i> (FEM); Abaqus	Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi bentuk penampang kolom terhadap kapasitas struktur kolom pada kombinasi beban aksial dan torsi, menganalisis tingkat kesesuaian hasil diagram interaksi kolom antara metode analitis dan metode numerik menggunakan <i>Finite Element Method</i> (FEM) pada aplikasi Abaqus, dan menentukan bentuk penampang kolom yang memberikan kinerja struktural paling optimal berdasarkan kapasitas aksial, kapasitas torsi, distribusi

tegangan, deformasi, dan pola kerusakan, dengan parameter material yang sama. Penelitian ini menunjukkan bahwa perbedaan bentuk penampang memengaruhi secara signifikan kemampuan kolom dalam menahan beban aksial, momen, dan torsi, meskipun kualitas beton, ukuran penampang, dan jumlah tulangan dijaga tetap sama. Kapasitas aksial beban sentris pada semua variasi kolom hampir sama, yaitu berada dalam rentang $12,06 \times 10^6$ N sampai $12,35 \times 10^6$ N. Namun, dalam kondisi keruntuhan tekan dan seimbang, terdapat perbedaan yang signifikan, yaitu kolom berbentuk persegi panjang dengan rasio 1:4 memiliki kapasitas aksial tertinggi sebesar 20.168.879 N, sedangkan kolom berbentuk persegi memiliki kapasitas terendah sebesar 5.987.336 N. Selain itu, kapasitas torsi terbesar didapat pada kolom berbentuk bulat karena distribusi tegangan geser lebih merata dan konstanta torsi lebih besar dibandingkan bentuk penampang lainnya. Analisis yang dilakukan menunjukkan bahwa metode numerik dengan menggunakan Abaqus cocok dan sesuai dengan metode analitis. Diagram interaksi P-M yang dihasilkan dari kedua metode menunjukkan pola kurva yang mirip, di mana titik-titik kondisi keruntuhan tekan, keruntuhan seimbang, dan keruntuhan tarik berada di posisi yang tidak jauh berbeda. Berdasarkan hasil perbandingan seluruh parameter kinerja struktur, tidak terdapat satu bentuk penampang yang unggul pada seluruh aspek pembebanan.

PENDAHULUAN

Pada struktur bangunan, terdapat komponen struktur penting yang saling memikul dan mengikat satu dengan yang lainnya. Komponen struktur tersebut terdiri dari pondasi, sloof, kolom, balok, pelat lantai, dan komponen struktur lainnya (Tungadi *et al.*, 2024).

Salah satu komponen struktur adalah kolom. Kolom merupakan salah satu komponen struktur yang paling kritis dalam suatu bangunan, karena berfungsi sebagai elemen penerus beban dari struktur atas menuju pondasi. Sebagai elemen tekan utama, kolom harus mampu menahan beban aksial sekaligus kombinasi aksial–momen akibat eksentrisitas maupun beban lateral seperti gempa dan angin (SNI 2847-2013). Kegagalan pada satu kolom berpotensi memicu keruntuhan elemen struktur lain yang terhubung, bahkan keruntuhan progresif pada keseluruhan bangunan, sehingga keandalan kolom menjadi penentu utama keamanan struktur secara keseluruhan (Sakti *et al.*, 2022; Yuniva *et al.*, 2022).

Bentuk penampang kolom terbukti memengaruhi perilaku struktural secara signifikan. Kolom bulat memiliki pengekangan (*confinement*) yang lebih merata dibandingkan kolom persegi akibat distribusi tekanan lateral yang lebih seragam pada beton inti (Utomo & Hakim, 2023), dan penampang spiral pada kolom bulat terbukti lebih efektif meningkatkan kekuatan serta mengubah pola keruntuhan dibandingkan sengkang persegi dengan jarak antar tulangan yang lebih jarang (Anama *et al.*, 2024; Tawfik *et al.*, 2021). Pada kondisi luas penampang dan luas tulangan yang sama, kolom bulat bahkan memiliki kapasitas momen yang lebih besar dibandingkan kolom persegi maupun persegi panjang (Utomo & Hakim, 2023). Meski demikian, kolom persegi tetap lebih banyak dipakai dalam praktik karena kemudahan pelaksanaan dan integrasinya dengan elemen

struktur lain, sehingga muncul pertanyaan mendasar: seberapa besar pengaruh murni geometri penampang terhadap kapasitas dan pola keruntuhan kolom jika seluruh parameter lain dikendalikan sama (Arsenta, 2024; Warman & Arifuddin, 2024).

Permasalahan menjadi lebih kompleks ketika kolom tidak hanya menerima beban aksial, tetapi juga torsi—momen yang bekerja terhadap sumbu longitudinal elemen akibat beban transversal yang tidak segaris dengan penampang (Tuwanakotta & Bernard, 2022). Kondisi pembebanan semacam ini cukup sering dijumpai di lapangan, antara lain pada bangunan dengan konfigurasi denah tidak simetris, gedung pelayanan publik seperti rumah sakit yang memiliki bentang dan fungsi ruang beragam, struktur dengan eksentrisitas beban akibat perbedaan kekakuan antarelemen, serta struktur tahan gempa yang berpotensi mengalami torsi akibat respons dinamik tidak simetris (Effendi, 2026; Lutffeoneta & Aminuddin, 2025). Pada kondisi tersebut, kapasitas dan pola keruntuhan kolom tidak lagi cukup dijelaskan melalui interaksi aksial–momen (P–M) yang umum dikaji, melainkan memerlukan pemahaman terhadap interaksi aksial–torsi (P–T) yang masih jauh lebih sedikit diteliti.

Seiring dengan perkembangan teknologi komputasi, *Finite Element Method*/FEM (metode elemen hingga) telah menjadi salah satu pendekatan yang banyak digunakan dalam analisis perilaku nonlinier struktur beton bertulang karena mampu merepresentasikan interaksi material secara lebih realistis, termasuk hubungan tegangan–regangan beton terkekang, perilaku plastis tulangan baja, serta mekanisme keretakan dan keruntuhan struktur (Islami & Putra, 2025; Rafifah & Clara, 2025).

Pada era modern ini, kemajuan teknologi *software* memberikan dampak yang sangat signifikan dalam pengembangan metode analisis suatu elemen struktur seperti kolom. Aplikasi desain kolom yang cukup familiar di antaranya; SAP 2000 (Safitri & Nuroji, 2011), CSI Etabs, Csicol, Spcolumn, dan aplikasi berbasis analisis *Finite Element Methode* (Ansys dan Abaqus/CAE) (Team, 2022).

Software Abaqus V6.14. merupakan salah satu *Software Computer-Aided Engineering* (CAE), yang merupakan aplikasi yang digunakan untuk pemodelan dan analisis komponen dan rakitan mekanis dan memvisualisasikan hasil analisis elemen hingga (Arini & Pradana, 2021). Abaqus merupakan *software* yang banyak digunakan dalam penelitian rekayasa struktur berbasis FEM yang memiliki kemampuan pemodelan material nonlinier yang kompleks, seperti *Concrete Damaged Plasticity* (CDP), sehingga memungkinkan simulasi perilaku beton bertulang secara lebih akurat mendekati kondisi aktual di lapangan.

Penelitian mengenai kolom beton bertulang menggunakan pendekatan numerik telah banyak dilakukan dengan berbagai variasi parameter, seperti mutu beton, rasio tulangan, tingkat pengekangan, maupun konfigurasi pembebanan. Namun demikian, terdapat beberapa kesenjangan (*research gap*) yang dapat diidentifikasi dari penelitian-penelitian terdahulu. Pertama, penelitian-penelitian sebelumnya mengenai kolom beton bertulang sebagian besar berfokus pada perilaku struktur terhadap kombinasi beban aksial dan momen lentur (P–M), karena kondisi tersebut merupakan bentuk pembebanan yang paling umum dijumpai pada elemen kolom bangunan gedung (Manguki et al., 2021).

Sementara itu, kajian yang secara khusus membahas pengaruh variasi bentuk penampang terhadap kombinasi beban aksial dan torsi (P–T) masih relatif terbatas.

Kedua, penelitian komparatif mengenai variasi bentuk penampang kolom umumnya dilakukan dengan membandingkan dimensi penampang yang berbeda-beda, seperti perbedaan luas penampang, dimensi, maupun luas tulangan pada setiap variasi bentuk, sehingga hasil yang diperoleh belum sepenuhnya menunjukkan pengaruh murni dari geometri penampang itu sendiri.

Ketiga, penelitian yang membandingkan kinerja kolom dengan luas penampang sama, luas tulangan sama, dan mutu beton sama, tetapi bentuk penampang berbeda, masih jarang dilakukan. Padahal, kondisi parameter yang identik tersebut diperlukan agar pengaruh geometri penampang terhadap kapasitas, daktilitas, dan pola keruntuhan dapat dievaluasi secara objektif tanpa dipengaruhi oleh perbedaan parameter material maupun penulangan.

Keempat, kajian numerik yang memanfaatkan kemampuan pemodelan nonlinier lanjutan pada Abaqus, khususnya model material *Concrete Damaged Plasticity* (CDP), untuk mengevaluasi perilaku kolom akibat kombinasi beban aksial dan torsi (P–T) masih relatif terbatas, sehingga evaluasi distribusi tegangan, deformasi, kapasitas ultimit, daktilitas, serta pola keruntuhan akibat variasi bentuk penampang pada kondisi pembebanan tersebut belum banyak dikaji secara komprehensif (Chen et al., 2022; Cuong-Le et al., 2021).

Berdasarkan keempat kesenjangan tersebut, dapat disimpulkan bahwa belum tersedia kajian komprehensif mengenai analisis perilaku kolom terhadap kombinasi beban aksial dan torsi dengan variasi bentuk penampang, di mana mutu beton, luas penampang, dan luas tulangan dibuat sama, sehingga pengaruh geometri penampang dapat dievaluasi secara lebih akurat menggunakan metode numerik FEM berbasis Abaqus dengan model material CDP (Mahmud et al., 2024).

Dalam penelitian ini, data perencanaan mutu beton, luas penampang, dan luas tulangan yang digunakan mengacu pada data perencanaan dari Proyek Rumah Sakit Pratama Nias Barat, sehingga model yang dianalisis merepresentasikan kondisi riil di lapangan. Dengan menggunakan data aktual proyek, hasil penelitian diharapkan lebih aplikatif dan relevan terhadap praktik perencanaan struktur beton bertulang.

Oleh karena itu, diperlukan suatu penelitian yang menganalisis dan membandingkan perilaku kolom persegi panjang dan kolom bulat dengan mutu beton, luas penampang, dan luas tulangan yang sama menggunakan metode elemen hingga berbasis Abaqus. Hal ini mendorong peneliti untuk melakukan penelitian yang berjudul *Analisis Perilaku Kolom terhadap Beban Aksial dan Torsi dengan Variasi Bentuk Penampang Menggunakan Finite Element Method (FEM) dengan Mutu Beton, Luas Penampang, dan Luas Tulangan yang Sama*.

Kebaruan (*novelty*) dalam penelitian ini terletak pada penerapan kondisi parameter yang identik antarvariasi bentuk penampang kolom serta pemanfaatan pemodelan nonlinier lanjutan pada Abaqus untuk kasus pembebanan aksial–torsi, yang secara spesifik dapat dirinci sebagai berikut.

1. Variasi bentuk penampang kolom, yaitu kolom persegi panjang dengan rasio 1:2, 1:3, dan 1:4, serta kolom bulat, dianalisis dengan luas penampang beton yang dibuat identik pada setiap variasi;
2. Luas tulangan longitudinal pada setiap variasi bentuk penampang dibuat sama, sehingga perbedaan hasil yang diperoleh murni disebabkan oleh perbedaan geometri penampang;
3. Mutu beton yang digunakan pada seluruh variasi bentuk penampang dibuat identik, yaitu $f'_c = 30$ MPa, sesuai data perencanaan Proyek Rumah Sakit Pratama Nias Barat;
4. Analisis dilakukan pada kondisi pembebanan aksial dan torsi (P-T) menggunakan metode elemen hingga (FEM) berbasis Abaqus dengan model material *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) untuk merepresentasikan perilaku nonlinier beton dan tulangan secara lebih realistis.

Evaluasi hasil dilakukan secara komprehensif meliputi distribusi tegangan, regangan, lendutan (deformasi), serta parameter *Scalar Stiffness Degradation* (SDEG) sebagai indikator tingkat kerusakan pada elemen kolom.

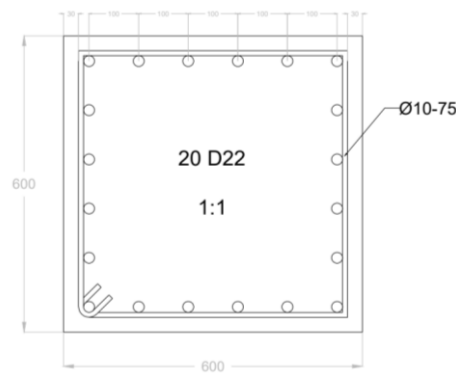
Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah: 1) Bagaimana pengaruh variasi bentuk penampang kolom terhadap kapasitas struktur kolom pada kombinasi beban aksial dan torsi? 2) Bagaimana tingkat kesesuaian diagram interaksi kolom yang diperoleh dari metode analitis dan metode *Finite Element Method* (FEM) pada aplikasi Abaqus? 3) Manakah bentuk penampang kolom yang memberikan kinerja struktural paling optimal berdasarkan kapasitas aksial, kapasitas torsi, distribusi tegangan, deformasi, dan pola kerusakan, dengan parameter material yang sama?

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan penelitian ini adalah: 1) Menganalisis pengaruh variasi bentuk penampang kolom terhadap kapasitas struktur kolom pada kombinasi beban aksial dan torsi; 2) Menganalisis tingkat kesesuaian hasil diagram interaksi kolom antara metode analitis dan metode numerik menggunakan *Finite Element Method* (FEM) pada aplikasi Abaqus; 3) Menentukan bentuk penampang kolom yang memberikan kinerja struktural paling optimal berdasarkan kapasitas aksial, kapasitas torsi, distribusi tegangan, deformasi, dan pola kerusakan, dengan parameter material yang sama.

METODE PENELITIAN

Parameter Pemodelan Penampang

Parameter pemodelan penampang pada penelitian ini didasarkan pada data perencanaan struktur kolom yang digunakan pada proyek pembangunan Rumah Sakit Pratama Nias Barat. Parameter yang diambil dari dokumen perencanaan meliputi mutu beton, mutu baja, dimensi penampang kolom, serta jumlah dan luas tulangan longitudinal yang digunakan. Data ini merupakan parameter dasar dalam proses *redesign* menggunakan metode FEM dengan *software* Abaqus.



Gambar 1. Desain kolom perencanaan lapangan
(Sumber: Data Perencana, 2025)

Tabel 1. Data perencanaan lapangan

Parameter	Nilai
h	600 mm
b	600 mm
Ag	360000 mm ²
Tulangan utama	379.94 mm ²
Ast	7598.8 mm ²
S	40 mm
Fy	420 MPa
F'c	30 MPa

(Sumber: Data Perencana, 2025)

Redesign Model Penampang

Pada penelitian ini dilakukan proses *redesign* model penampang kolom dengan beberapa variasi bentuk penampang. Dalam proses *redesign*, data yang digunakan adalah parameter pada tabel 1. agar hasil analisis dapat dibandingkan secara objektif. Parameter yang dijaga tetap sama pada seluruh model antara lain mutu beton, mutu baja, dimensi penampang kolom, serta jumlah dan luas tulangan longitudinal. Dengan demikian, perbedaan perilaku struktur yang terjadi pada setiap model hanya disebabkan oleh perbedaan bentuk penampang.

Variasi bentuk penampang yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Penampang persegi panjang dengan rasio 1:2
2. Penampang persegi panjang dengan rasio 1:3
3. Penampang persegi panjang dengan rasio 1:4
4. Penampang bulat

Berdasarkan variasi ukuran penampang dan tulangan yang telah ditentukan didapatkan bahwa luas penampang dan luas tulangan tidak benar-benar sama melainkan mendekati luas penampang dan tulangan kolom 1:1.

Analisa Kondisi Pembebanan Kolom

Beban aksial yang bekerja pada penampang kolom dibedakan atas dua macam yaitu beban sentris dan beban eksentris. Untuk penampang kolom dengan beban eksentris masih dibedakan lagi menjadi enam macam yaitu:

1. Penampang kolom dengan beban sentris;
2. Penampang kolom dengan keruntuhan tekan;
3. Penampang kolom dengan keruntuhan seimbang (*balance*);
4. Penampang kolom dengan keruntuhan tarik; dan
5. Penampang kolom dengan kondisi beban $P_n = 0$;
6. Penampang kolom dengan momen torsi.

Diagram Interaksi Kolom

Diagram interaksi kolom merupakan representasi grafis yang menunjukkan hubungan kapasitas elemen kolom dalam menahan kombinasi gaya dalam yang bekerja secara simultan. Pada penelitian ini, diagram interaksi digunakan untuk menggambarkan perilaku kolom akibat kombinasi beban aksial (P) dan torsi (T) pada berbagai bentuk penampang, dengan mutu beton, luas penampang, dan luas tulangan yang sama.

Secara umum, kolom tidak hanya menerima beban aksial tekan dari struktur di atasnya, tetapi juga dapat mengalami torsi akibat ketidaksimetrian geometri, eksentrisitas pembebanan, ketidakaturan struktur, maupun pengaruh gaya lateral. Kombinasi kedua beban tersebut menyebabkan kapasitas kolom menjadi lebih kompleks dibandingkan apabila hanya menerima beban tunggal.

Diagram interaksi aksial–torsi menunjukkan batas kemampuan maksimum kolom dalam menahan kombinasi nilai P dan T sebelum mengalami keruntuhan. Setiap titik pada kurva interaksi merepresentasikan pasangan nilai beban aksial dan torsi yang masih dapat dipikul kolom. Titik yang berada di dalam kurva menunjukkan kondisi aman, sedangkan titik di luar kurva menunjukkan kondisi beban yang melampaui kapasitas penampang.

Pada kondisi beban aksial murni, kolom memiliki kapasitas tekan maksimum dan nilai torsi sama dengan nol. Sebaliknya, pada kondisi torsi murni, kapasitas torsi maksimum terjadi saat beban aksial mendekati nol. Ketika kedua beban bekerja bersamaan, peningkatan beban aksial umumnya akan menurunkan kapasitas torsi, demikian pula peningkatan torsi akan mengurangi kemampuan kolom dalam memikul beban aksial.

Dalam penelitian ini, diagram interaksi diperoleh melalui analisis numerik menggunakan *Finite Element Method* (FEM). Setiap variasi bentuk penampang dimodelkan dengan parameter material dan luas penampang yang sama, sehingga perbedaan perilaku struktur yang terjadi dapat diidentifikasi sebagai pengaruh bentuk geometri penampang. Hasil diagram interaksi selanjutnya digunakan untuk membandingkan efisiensi masing-masing bentuk penampang dalam menahan kombinasi beban aksial dan torsi.

Melalui diagram interaksi tersebut dapat diketahui bentuk penampang yang memiliki kapasitas paling optimum, distribusi tegangan yang lebih merata, serta ketahanan yang lebih baik terhadap kombinasi pembebanan. Oleh karena itu, diagram interaksi menjadi salah satu parameter utama dalam mengevaluasi performa kolom pada penelitian ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Perbandingan Perilaku Antara Variasi Kolom

Pengaruh Bentuk Penampang terhadap Kapasitas Aksial

Kapasitas aksial beban sentris (P_0) pada seluruh variasi kolom menunjukkan nilai yang relatif sama, berkisar antara $12,06 \times 10^6$ N hingga $12,35 \times 10^6$ N (metode analitis). Keseragaman ini konsisten dengan asumsi penelitian, di mana mutu beton, luas penampang, dan luas tulangan dijaga sama untuk seluruh variasi. Perbedaan kecil yang terjadi disebabkan oleh perbedaan distribusi tulangan yang memengaruhi kontribusi tulangan tekan.

Namun demikian, kapasitas aksial pada kondisi keruntuhan tekan dan seimbang menunjukkan perbedaan yang signifikan antar variasi kolom. Kolom persegi panjang rasio 1:4 memiliki kapasitas P_n tertinggi pada kondisi keruntuhan tekan sebesar 20.168.879 N, sedangkan kolom persegi memiliki nilai terendah sebesar 5.987.336 N. Fenomena ini terjadi karena pada penampang yang lebih ramping (rasio aspek tinggi), blok tegangan tekan beton memiliki luasan efektif yang lebih besar pada arah kuat, sehingga gaya tekan beton (C_c) lebih besar.

Pengaruh Bentuk Penampang terhadap Kapasitas Momen

Kapasitas momen nominal (M_n) menunjukkan tren yang jelas yaitu semakin besar rasio aspek penampang, semakin tinggi kapasitas momen pada arah kuat (*strong axis*). Kolom persegi panjang rasio 1:4 memiliki kapasitas M_n tertinggi pada kondisi keruntuhan seimbang sebesar 6.239.944.211 Nmm, sedangkan Kolom bulat memiliki nilai terendah sebesar 1.140.948.691 Nmm. Hal ini disebabkan oleh lengan momen (jd) yang lebih panjang pada penampang dengan rasio aspek tinggi, yang secara langsung meningkatkan kapasitas momen.

Perlu dicatat bahwa perbandingan ini hanya berlaku untuk lentur pada sumbu kuat (*strong axis*) (Erwansyah et al., 2022). Apabila lentur terjadi pada sumbu lemah (*weak axis*), hasil yang berlawanan akan diperoleh, di mana kolom dengan rasio aspek tinggi justru memiliki kapasitas momen yang lebih rendah.

Pengaruh Bentuk Penampang terhadap Kapasitas Torsi

Perbandingan kapasitas torsi nominal antar variasi kolom menjadi salah satu fokus utama penelitian ini. Tabel berikut merangkum kapasitas torsi dari kedua metode.

Hasil perbandingan kapasitas torsi menunjukkan bahwa kolom bulat memiliki kapasitas torsi tertinggi, baik pada metode analitis (508.586.366 Nmm) maupun metode numerik (479.004.000 Nmm). Hal ini konsisten dengan teori elastisitas yang menyatakan bahwa untuk luas penampang yang sama, penampang lingkaran memiliki konstanta torsi St. Venant (J) yang paling besar, sehingga menghasilkan kekakuan dan kapasitas torsi tertinggi.

Tren penurunan kapasitas torsi terlihat jelas pada penampang persegi panjang: dari kolom persegi ke kolom persegi panjang rasio 1:2 ke kolom persegi panjang rasio 1:3 dan ke kolom persegi panjang rasio 1:4, kapasitas torsi semakin menurun. Semakin besar rasio aspek (semakin ramping penampang), semakin tidak efisien distribusi tegangan geser torsi, sehingga kapasitas torsi semakin berkurang. Penurunan ini terjadi

karena tegangan geser torsi terkonsentrasi pada titik tengah sisi terpanjang, sedangkan sudut-sudut penampang hampir tidak memberikan kontribusi.

Penampang bulat melampaui seluruh penampang persegi panjang dalam hal kapasitas torsi karena distribusi tegangan geser yang seragam di seluruh keliling (Fachri et al., 2023). Tidak ada konsentrasi tegangan di titik tertentu, sehingga seluruh material bekerja secara optimal.

Pola Kerusakan Beton (SDEG) dan Distribusi Tegangan Geser Torsi

Analisis pola kerusakan beton (*Scalar Damage/SDEG*) dari hasil *software* Abaqus memberikan gambaran tentang distribusi dan pola keruntuhan pada setiap variasi penampang ketika menerima beban torsi. Nilai SDEG = 1 menandakan beton telah mengalami kerusakan penuh (hancur).

Pada penampang persegi dan persegi panjang, pola kerusakan akibat torsi umumnya berbentuk spiral yang dimulai dari sudut-sudut penampang, di mana konsentrasi tegangan geser relatif lebih rendah secara teoritis namun kondisi tegangan triaksial menyebabkan percepatan kerusakan. Pada penampang lingkaran, pola kerusakan torsi lebih merata di seluruh keliling, mengonfirmasi distribusi tegangan geser yang lebih homogen.

Distribusi tegangan geser (*Shear Stress Distribution*) pada kondisi torsi menunjukkan bahwa tegangan geser maksimum pada penampang persegi panjang terletak di titik tengah sisi terpanjang, sedangkan sudut-sudut penampang memiliki tegangan geser mendekati nol. Fenomena ini konsisten dengan teori St. Venant tentang torsi penampang solid.

Perbandingan Hasil Analisis Metode Analitis dan Metode Numerik

Pada sub bab ini disajikan perbandingan antara hasil analisis metode analitis dengan hasil analisis metode numerik (*software* Abaqus) untuk setiap kolom, yang meliputi perbandingan nilai P_n , M_n , T_n , serta diagram interaksi kolom.

Hasil penelitian juga menunjukkan hasil yang berbeda antara analisis dengan menggunakan metode analitis dan metode numerik, di mana hal tersebut bisa terjadi karena:

a. Pengaruh nonlinieritas material

Pada Abaqus, beton tidak langsung hancur, melainkan melewati tahapan retakan, pelunakan, dan kerusakan yang berlangsung secara bertahap, yang diwakili oleh parameter seperti SDEG. Keadaan ini mengakibatkan penyebaran tegangan yang sebenarnya tidak sama dengan asumsi penyebaran tegangan dalam metode analitis, yang membuat nilai kapasitas yang dihasilkan sedikit berbeda.

b. Distribusi tegangan yang lebih realistis

Metode analisis memperlakukan distribusi tegangan pada penampang sesuai dengan bentuk ideal yang telah ditentukan, sementara metode elemen hingga melakukan perhitungan tegangan pada setiap elemen dalam *mesh* secara lokal. Hal ini memungkinkan identifikasi yang lebih jelas terhadap konsentrasi tegangan di sudut penampang, di sekitar tulangan, serta pada area yang mengalami torsi, sehingga menghasilkan respons struktur yang lebih akurat.

Persentase Perbandingan Hasil Analisis Metode Analitis dan Metode Numerik

Persentase perbandingan dihitung berdasarkan perbedaan antara hasil metode analitis dan metode numerik terhadap nilai analitis sebagai referensi. Tabel-tabel berikut menyajikan persentase perbandingan untuk setiap variasi kolom.

Tabel 2. Rekap hasil analisis dengan menggunakan metode analitis dengan metode numerik kolom persegi

	Beban Sentris	Keruntuhan Tekan	Keruntuhan Seimbang	Keruntuhan Tarik	Pn=0	Torsi
Pn (N)	3%	3%	2%	2%		
Mn (Nmm)		3%	2%	2%	13%	5%

(Sumber: Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 3. Rekap hasil analisis dengan menggunakan metode analitis dengan metode numerik kolom persegi panjang rasio 1:2

	Beban Sentris	Keruntuhan Tekan	Keruntuhan Seimbang	Keruntuhan Tarik	Pn=0	Torsi
Pn (N)	2%	3%	3%	1%		
Mn (Nmm)		3%	3%	1%	13%	12%

(Sumber: Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 4. Rekap hasil analisis dengan menggunakan metode analitis dengan metode numerik kolom persegi panjang rasio 1:3

	Beban Sentris	Keruntuhan Tekan	Keruntuhan Seimbang	Keruntuhan Tarik	Pn=0	Torsi
Pn (N)	1%	2%	3%	1%		
Mn (Nmm)		2%	3%	1%	21%	7%

(Sumber: Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 5. Rekap hasil analisis dengan menggunakan metode analitis dengan metode numerik kolom persegi panjang rasio 1:4

	Beban Sentris	Keruntuhan Tekan	Keruntuhan Seimbang	Keruntuhan Tarik	Pn=0	Torsi
Pn (N)	1%	2%	3%	1%		
Mn (Nmm)		2%	3%	1%	36%	6%

(Sumber: Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 6. Rekap hasil analisis dengan menggunakan metode analitis dengan metode numerik kolom bulat

	Beban Sentris	Keruntuhan Tekan	Keruntuhan Seimbang	Keruntuhan Tarik	Pn=0	Torsi
Pn (N)	1%	1%	3%	1%		
Mn (Nmm)		1%	3%	1%	17%	2%

(Sumber: Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan tabel persentase selisih di atas, dapat disimpulkan bahwa secara umum perbedaan antara metode analitis dan metode numerik berada pada rentang 1%

hingga 3% untuk kondisi P_n dan M_n pada kondisi keruntuhan tekan, seimbang, dan tarik. Hal ini menunjukkan bahwa model FEM yang dikembangkan dalam penelitian ini memiliki tingkat akurasi yang sangat baik dan dapat diterima sebagai validasi silang (*cross-validation*) antara kedua metode.

Park dan Paulay (1988) menjelaskan interaksi aksial-momen (P-M) kolom secara analitis berdasarkan kompatibilitas regangan dan keseimbangan gaya dalam, pendekatan yang sama digunakan pada metode analitis dalam penelitian ini. Park dan Paulay juga menegaskan bahwa kolom dengan sengkang spiral (bulat) memiliki perilaku pasca-tekan-maksimum yang lebih ulet dibandingkan kolom persegi bersengkang biasa, karena keruntuhan selimut beton pada kolom persegi cenderung lebih getas dan diikuti tertekuknya tulangan longitudinal.

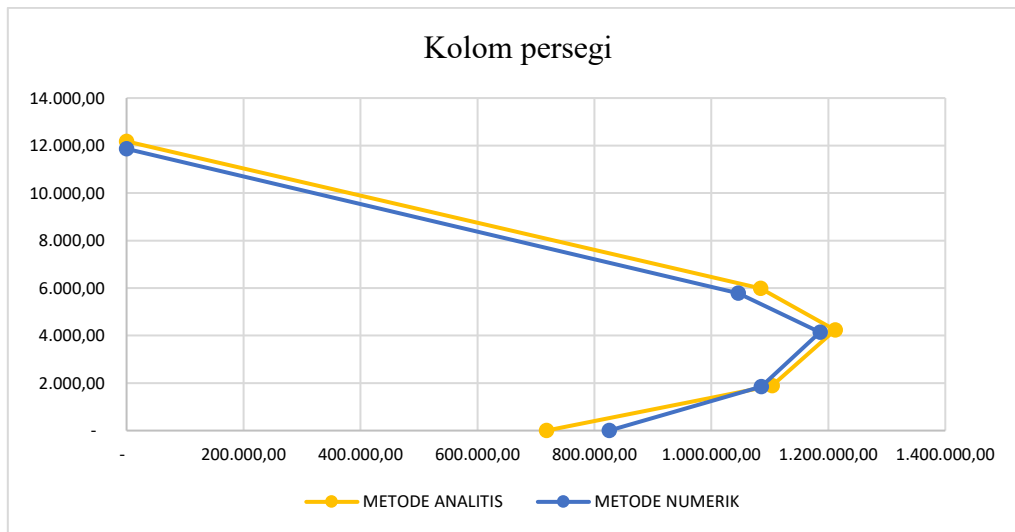
Hasil validasi silang antara metode analitis dan metode numerik pada penelitian ini secara umum konsisten dengan prinsip tersebut, dengan selisih kecil sebesar 1% hingga 3% pada kondisi beban sentris, keruntuhan tekan, keruntuhan seimbang, dan keruntuhan tarik. Hal ini menegaskan bahwa pendekatan keseimbangan gaya dalam yang digunakan Park dan Paulay tetap valid meskipun bentuk penampang divariasikan.

Pada penelitian ini, selisih yang lebih besar terlihat pada kondisi $P_n = 0$ (lentur murni), berkisar antara 13% hingga 36%, dengan selisih terbesar terjadi pada kolom persegi panjang rasio 1:4. Hal ini dapat disebabkan oleh perbedaan asumsi dalam pemodelan kondisi tanpa beban aksial pada metode numerik, di mana efek non-linearitas material (*concrete damaged plasticity*) memberikan kontribusi yang lebih signifikan pada kondisi lentur murni. Pada kondisi torsi, selisih berkisar antara 2% hingga 12%, dengan selisih terbesar pada kolom persegi panjang rasio 1:2.

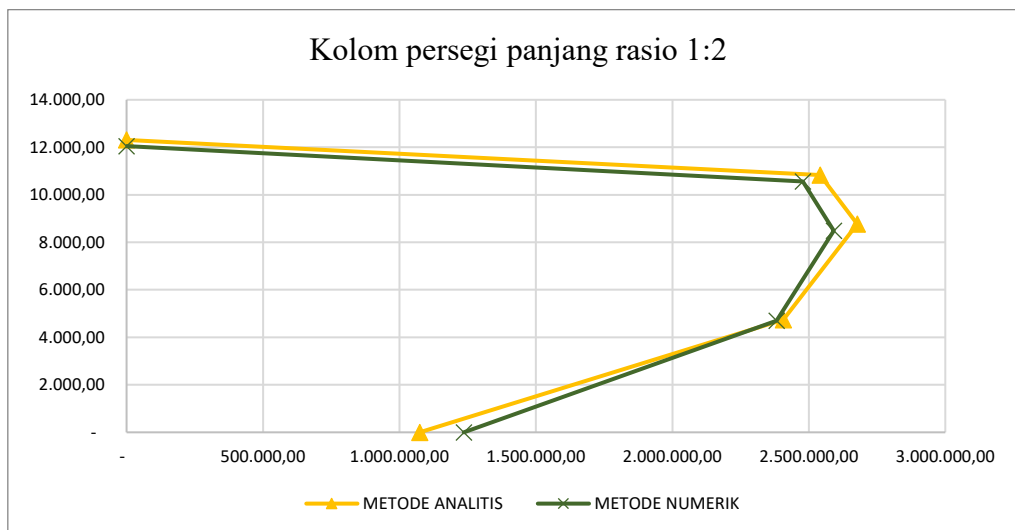
Selisih yang terjadi tersebut tidak dibahas secara khusus dalam teori klasik Park dan Paulay. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan analitis klasik kurang representatif pada kondisi beban aksial mendekati nol, karena tidak memperhitungkan efek non-linearitas material (*concrete damaged plasticity*) yang ditangkap oleh model FEM.

Perbandingan Diagram Interaksi Kolom

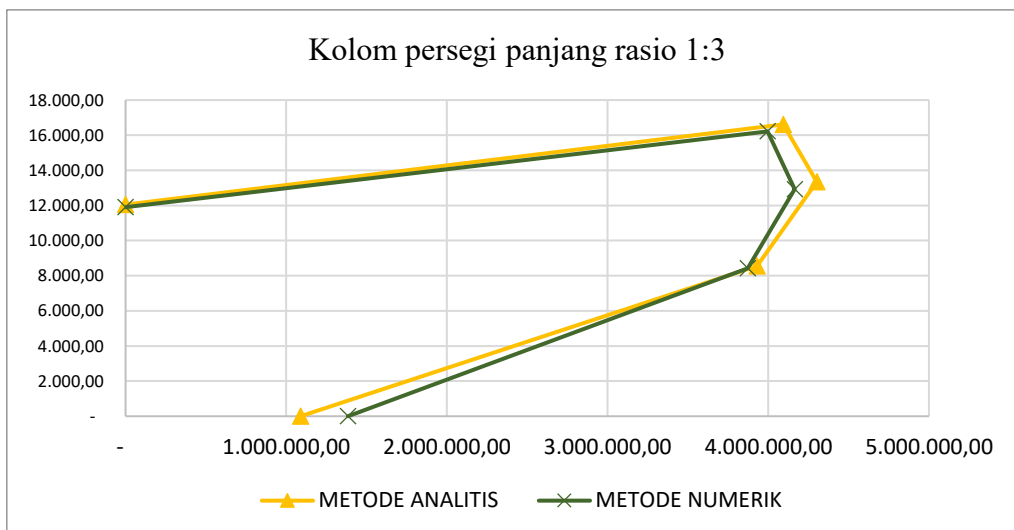
Diagram interaksi kolom merupakan representasi grafis dari seluruh kombinasi kapasitas aksial (P_n) dan momen (M_n) yang dapat dipikul oleh penampang kolom. Perbandingan diagram interaksi antara metode analitis dan metode numerik disajikan untuk setiap variasi kolom.



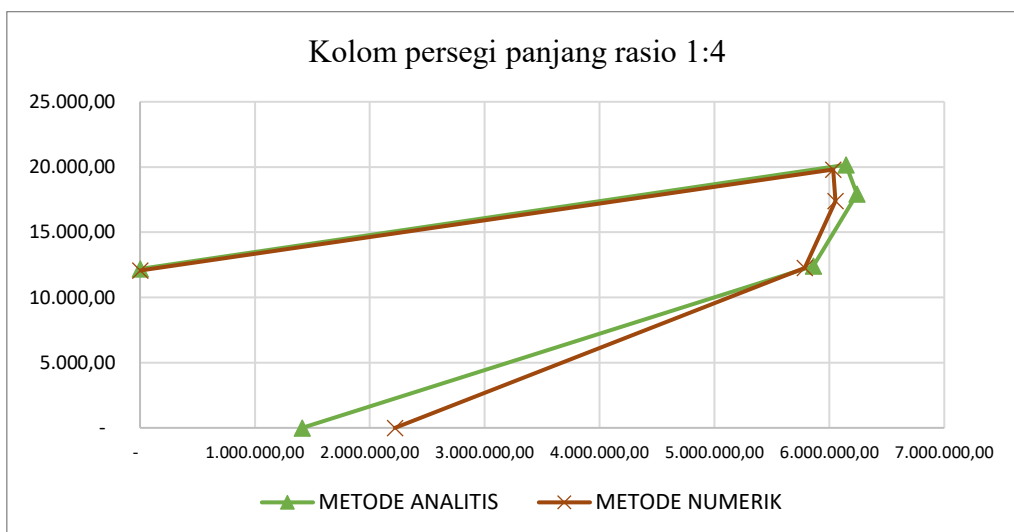
Gambar 2. Diagram interaksi kolom persegi
(Sumber: Olahan Peneliti, 2026)



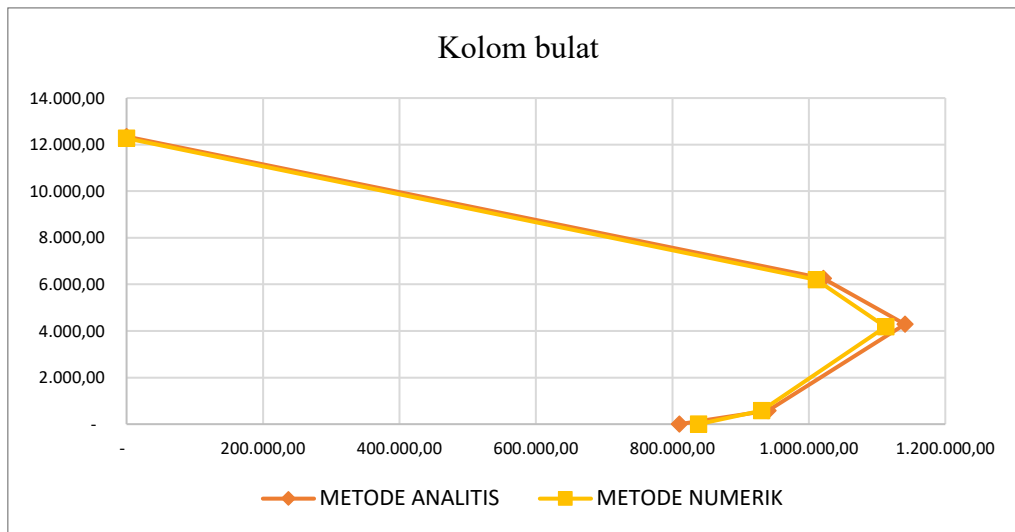
Gambar 3. Diagram interaksi kolom persegi panjang rasio 1:2
(Sumber: Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 4. Diagram interaksi kolom persegi panjang rasio 1:3
(Sumber: Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 5. Diagram interaksi kolom persegi panjang rasio 1:4
(Sumber: Olahan Peneliti, 2026)



Gambar 6. Diagram interaksi kolom bulat
(Sumber: Olahan Peneliti, 2026)

Diagram interaksi yang dihasilkan oleh metode numerik menunjukkan kesesuaian yang baik dengan kurva analitis. Titik-titik kondisi keruntuhan tekan, seimbang, dan tarik pada metode numerik terletak pada posisi yang berdekatan dengan kurva analitis, mengonfirmasi validitas model FEM yang digunakan.

Perbandingan Distribusi Tegangan, Regangan, Lendutan, dan SDEG

a. Distribusi tegangan

Titik fokus tekanan muncul akibat perubahan bentuk penampang dan jalur aliran gaya yang mengakibatkan distribusi tekanan tidak merata di seluruh penampang.

Pada penampang persegi dan persegi panjang, adanya sudut-sudut tajam menyebabkan redistribusi tegangan sehingga terjadi konsentrasi tegangan di daerah tertentu ketika menerima kombinasi beban aksial dan torsi.

Pada penampang bulat, tidak terdapat sudut sehingga aliran tegangan mengelilingi penampang secara lebih kontinu dan homogen. Akibatnya konsentrasi tegangan lokal berkurang dan distribusi tegangan menjadi lebih merata.

b. Distribusi regangan

Distribusi regangan sangat dipengaruhi oleh efektivitas *confinement* (pengekangan beton inti). Ada kolom berbentuk melingkar, sengkang berbentuk spiral atau pengekangan yang berbentuk lingkaran memberikan tekanan samping yang cukup merata ke seluruh beton inti sehingga deformasi bisa terdistribusi lebih merata. Beton dapat mempertahankan kemampuannya pada tingkat regangan yang lebih tinggi sebelum mengalami kerusakan.

Pada kolom persegi dan persegi panjang, pengekangan efektif terutama terjadi di sekitar sudut, sedangkan bagian tengah sisi lurus menerima pengekangan yang lebih kecil. Akibatnya regangan lebih mudah terkonsentrasi pada daerah tertentu sehingga deformasi lokal berkembang lebih cepat.

Mander et al. (1988) menyatakan bahwa efektivitas pengekan (*confinement*) sangat dipengaruhi oleh bentuk dan konfigurasi sengkang. Pada penampang bulat dengan sengkang spiral, tekanan lateral terdistribusi merata mengelilingi inti beton sehingga seluruh inti terkekang secara optimal dan daktilitas meningkat signifikan. Pada penampang persegi dan persegi panjang, tekanan lateral hanya efektif terkonsentrasi di sekitar sudut, sedangkan bagian tengah sisi lurus mengalami pengekan yang jauh lebih lemah akibat efek “*arching action*” antar titik sengkang.

Hasil penelitian ini sejalan dengan teori tersebut, di mana distribusi regangan pada kolom bulat lebih merata, sedangkan pada kolom persegi dan persegi panjang regangan terkonsentrasi pada sudut penampang. Namun, penelitian ini memperluas penerapan konsep Mander et al. yang awalnya berfokus pada kapasitas aksial dan daktilitas pada kondisi lentur, ke kondisi pembebanan kombinasi aksial dan torsi, yang ditunjukkan melalui pola kerusakan (SDEG) dan lendutan akibat torsi pada kelima variasi penampang. Lendutan

Besarnya lendutan dipengaruhi oleh kekakuan torsi (*torsional stiffness*) yang berkaitan erat dengan konstanta torsi (*torsional constant*, J). Penampang yang memiliki nilai J yang tinggi cenderung memiliki kekakuan torsi yang lebih besar, sehingga mengalami deformasi puntir dan lendutan yang lebih rendah.

Pada kolom bulat, distribusi tegangan geser terjadi secara merata di seluruh keliling sehingga memiliki konstanta torsi terbesar dan mampu menahan puntiran dengan lebih baik. Oleh karena itu deformasi akibat torsi relatif lebih kecil. Sebaliknya, pada ruang berbentuk persegi panjang dengan rasio aspek yang tinggi, ketahanan terhadap torsi berkurang karena penyebaran tegangan geser tidak efektif. Hasilnya, rotasi puntir menjadi lebih tinggi dan deformasi yang terjadi semakin besar.

SDEG

Pada Abaqus dengan model *Concrete Damaged Plasticity* (CDP), retak tidak ditampilkan sebagai celah fisik, tetapi direpresentasikan oleh parameter *Scalar Damage* (SDEG). Ketika nilai SDEG mendekati 1, beton dianggap mengalami kerusakan penuh. Inisiasi retak berada pada bagian kolom yang mengalami konsentrasi tegangan paling tinggi, sedangkan rambatan retak merupakan perkembangan dari retak yang sudah lebih dahulu terjadi.

Rekap Hasil Analisis

Berdasarkan hasil penelitian, didapatkan rekapitulasi seperti berikut.

Tabel 7. Rekap hasil analisis

Bentuk Penampang	Pn Beban Sentris (N)	Pn Keruntuhan Tekan (N)	Mn Keruntuhan Tekan (Nmm)	Tn (Nmm)
Persegi	12,177,727	5,987,336	1,103,971,452	498,729,600
Persegi Panjang 1:2	12,308,700	10,837,555	2,541,278,262	486,900,960
Persegi Panjang 1:3	12,056,080	16,613,038	4,093,371,779	469,053,200

Persegi Panjang 1:4	12,192,591	20,168,879	6,144,523,916	457,008,160
Bulat	12,345,750	6,260,271	1,020,949,392	508,586,366

(Sumber: Olahan Peneliti, 2026)

Dari hasil analisis dapat ditentukan kolom dengan bentuk apa saja yang dapat diandal pada setiap gaya yang terjadi.

- a. Berdasarkan kapasitas aksial, Pn Keruntuhan Tekan

Tabel 8. Rekap hasil analisis berdasarkan kapasitas aksial (Pn) Keruntuhan Tekan

Ranking	Bentuk Penampang	Pn (N)
1	Persegi Panjang 1:4	20,168,879
2	Persegi Panjang 1:3	16,613,038
3	Persegi Panjang 1:2	10,837,555
4	Bulat	6,260,271
5	Persegi	5,987,336

(Sumber: Olahan Peneliti, 2026)

Dapat disimpulkan bahwa kolom persegi panjang dengan perbandingan 1:4 menjadi kolom dengan kapasitas terbaik dalam menahan beban aksial.

- b. Berdasarkan kapasitas momen, Mn Keruntuhan Tekan

Tabel 9. Rekap hasil analisis berdasarkan kapasitas momen (Mn) Keruntuhan Tekan

Ranking	Bentuk Penampang	Mn (Nmm)
1	Persegi Panjang 1:4	6,144,523,916
2	Persegi Panjang 1:3	4,093,371,779
3	Persegi Panjang 1:2	2,541,278,262
4	Persegi	1,103,971,452
5	Bulat	1,020,949,392

(Sumber: Olahan Peneliti, 2026)

Dapat disimpulkan bahwa kolom persegi panjang dengan perbandingan 1:4 menjadi kolom dengan kapasitas terbaik dalam menahan momen.

- c. Berdasarkan kapasitas Torsi, Tn

Tabel 10. Rekap hasil analisis berdasarkan kapasitas Torsi (Tn)

Ranking	Bentuk Penampang	Tn (Nmm)
1	Bulat	508,586,366
2	Persegi	498,729,600
3	Persegi Panjang 1:2	486,900,960
4	Persegi Panjang 1:3	469,053,200
5	Persegi Panjang 1:4	457,008,160

(Sumber: Olahan Peneliti, 2026)

Dapat disimpulkan bahwa kolom bulat menjadi kolom dengan kapasitas terbaik dalam menahan momen torsi.

d. Berdasarkan deformasi

Tabel 11. Rekap hasil analisis berdasarkan deformasi

Ranking	Bentuk Penampang	Nilai	Deformasi
1	Bulat	307E+01	Paling kecil
2	Persegi	2.86E+01	Kecil
3	Persegi Panjang 1:2	8.25E+00	Sedang
4	Persegi Panjang 1:3	4.16E+00	Besar
5	Persegi Panjang 1:4	2.83E+00	Paling besar

(Sumber: Olahan Peneliti, 2026)

Dapat disimpulkan bahwa kolom bulat menjadi kolom dengan kemampuan terbaik dalam menahan deformasi yang terjadi.

e. Berdasarkan kerusakan SDEG

Tabel 12. Rekap hasil analisis berdasarkan kerusakan SDEG

Ranking	Bentuk Penampang	Nilai	Tingkat Kerusakan (SDEG)
1	Bulat	8.59E-01	Paling rendah / distribusi paling merata
2	Persegi	8.59E-01	Rendah
3	Persegi Panjang 1:2	7.90E-01	Sedang
4	Persegi Panjang 1:3	4.84E-01	Tinggi
5	Persegi Panjang 1:4	1.82E-01	Paling tinggi

(Sumber: Olahan Peneliti, 2026)

Dapat disimpulkan bahwa kolom bulat menjadi kolom dengan tingkat kerusakan paling rendah dengan distribusi paling merata.

Secara umum, kolom berbentuk persegi panjang dengan rasio 1:4 memiliki keunggulan dalam kapasitas aksial dan momen, sementara kolom berbentuk bulat menunjukkan kinerja yang lebih baik terhadap torsi. Kolom bulat menunjukkan lendutan yang paling minim dan pola kerusakan yang paling konsisten, menjadikannya lebih efektif dalam situasi dengan beban puntir yang dominan dan kebutuhan akan daktilitas yang tinggi.

Utomo dan Hakim (2023) meneliti kolom dengan variasi bentuk penampang persegi, bulat, dan persegi panjang menggunakan luas penampang beton dan luas tulangan yang sama, dimodelkan dengan SAP2000. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa penampang persegi panjang (64 cm × 25 cm) paling efisien, bukan karena memiliki momen nominal (M_n) tertinggi, melainkan karena rasio M_n terhadap momen ultimit (M_u) paling mendekati 1 ($M_n = 129.591,98$ Nm berbanding $M_u = 119.772,07$ Nm), sementara penampang persegi dan bulat memiliki M_n jauh melebihi M_u sehingga dinilai kurang efisien (*overdesign*).

Hasil penelitian ini secara sepintas tampak sejalan, karena kolom persegi panjang (rasio 1:4) juga unggul pada kapasitas aksial dan momen tertinggi dibandingkan keempat variasi lainnya. Namun, kedua penelitian menggunakan kriteria penilaian yang berbeda: Utomo dan Hakim menilai efisiensi desain melalui kedekatan M_n terhadap M_u ,

sedangkan penelitian ini menilai kapasitas maksimum struktural secara absolut. Perbedaan metode pemodelan juga berpengaruh, yaitu SAP2000 yang umumnya bersifat elastis-linear pada elemen frame, dibandingkan dengan Abaqus berbasis *Concrete Damaged Plasticity* pada penelitian ini, yang mampu menangkap non-linearitas material, retak, dan distribusi tegangan lokal.

Selain itu, Utomo dan Hakim tidak meninjau beban torsi, sehingga temuan pada penelitian ini bahwa kolom bulat lebih unggul dalam menahan torsi, lendutan, dan kerusakan (SDEG) merupakan kontribusi tambahan yang tidak tercakup pada penelitian tersebut. Variasi rasio penampang persegi panjang pada penelitian ini (1:2 hingga 1:4) juga lebih beragam dibandingkan satu rasio tunggal yang diuji oleh Utomo dan Hakim, sehingga memperlihatkan tren bahwa semakin tinggi rasio aspek penampang, semakin besar kapasitas aksial dan momen yang dicapai, namun semakin menurun performa terhadap torsi dan deformasi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis analitis dan numerik menggunakan *Finite Element Method* (FEM) pada software Abaqus, dapat disimpulkan bahwa variasi bentuk penampang berpengaruh signifikan terhadap kapasitas kolom beton bertulang dalam menerima beban aksial, momen, dan torsi, meskipun mutu beton, dimensi penampang, serta jumlah tulangan dibuat sama. Kapasitas aksial sentris seluruh variasi kolom relatif seragam dengan rentang $12,06 \times 10^6$ N hingga $12,35 \times 10^6$ N, namun pada kondisi keruntuhan tekan dan seimbang terdapat perbedaan yang signifikan, dengan kolom persegi panjang rasio 1:4 menghasilkan kapasitas aksial dan momen tertinggi masing-masing sebesar 20.168.879 N dan 6.239.944.211 Nmm, sedangkan kolom persegi memiliki kapasitas terendah. Sementara itu, kolom berbentuk bulat menunjukkan kinerja terbaik terhadap beban torsi dengan kapasitas analitis sebesar 508.586.366 Nmm dan numerik sebesar 479.004.000 Nmm akibat distribusi tegangan geser yang lebih merata serta efek *confinement* yang lebih baik. Hasil validasi antara metode analitis dan simulasi Abaqus menunjukkan pola diagram interaksi P-M yang serupa dengan perbedaan hasil yang masih dalam batas toleransi, sehingga pendekatan FEM dapat digunakan sebagai alternatif yang andal dalam memprediksi perilaku kolom beton bertulang. Secara keseluruhan, tidak terdapat satu bentuk penampang yang unggul pada seluruh parameter kinerja; kolom persegi panjang rasio 1:4 paling efektif untuk kapasitas aksial dan momen lentur, sedangkan kolom bulat merupakan pilihan optimal untuk kombinasi beban aksial dan torsi karena memiliki kapasitas torsi tertinggi serta distribusi tegangan yang lebih baik.

REFERENSI

- Anama, M. K., Amirb, F., & Sutrisnob, M. (2024). Perbandingan kapasitas kolom beton bertulang berdasarkan variasi bentuk sengkang dengan analisis finite element method. *Civil Engineering Journal*, 5(1).
- Arsenta, K. (2024). Perbandingan pemodelan struktur menggunakan metode elemen

- hingga: Studi literatur dari berbagai aplikasi struktur sipil dan mekanik. *Journal of Infrastructure and Construction Technology*, 2(2), 66–72.
- Chen, L., Liu, D., Lei, M., Zhang, Y., Zhao, T., & Zheng, Y. (2022). The study on the constitutive model of concrete for explicit dynamic of ABAQUS based on damage energy. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/1914314>
- Cuong-Le, T., Minh, H. Le, & Sang-To, T. (2021). A nonlinear concrete damaged plasticity model for simulation reinforced concrete structures using ABAQUS. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 16(59), 232–242. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.59.17>
- Effendi, M. K. (2026). Analisis elemen hingga berbasis elemen fiber penampang pada kolom beton bertulang. *Jurnal Teknik Sipil*, 15(1).
- Erwansyah, I., Tarigan, G., & Simbolon, R. H. T. (2022). Analisis perbandingan struktur kolom bulat dan kolom persegi terhadap kekuatan dan biaya. *Buletin Utama Teknik*, 17(3), 230–234.
- Fachri, M., Sahputra, D. E., Trinanda, A. Y., & Imani, R. (2023). Analisis perbandingan perilaku struktur dengan variasi bentuk penampang kolom beton bertulang. *Civil Engineering Collaboration*, 8(2), 1–6.
- Islami, D. N., & Putra, M. R. F. (2025). Studi komparatif analisis struktur portal 3D dan rangka batang 3D menggunakan metode elemen hingga dan SAP2000. *Journal of Infrastructure and Construction Technology*, 3(1), 21–29.
- Lutffeoneta, A., & Aminuddin, K. M. (2025). Pengaruh variasi jarak tulangan spiral terhadap perilaku kolom akibat beban aksial konsentris menggunakan finite element analysis. *Journal of Syntax Literate*, 10(6).
- Mahmud, F., Suparjo, Merdana, I. N., & Suharto, L. (2024). Analisa numerik kekuatan sambungan balok-kolom dengan haunch, extended end plate dan baut dengan metode elemen hingga pada bangunan SMF. *Spektrum Sipil*, 11(1), 9–18.
- Manguki, I. D. K., Tanijaya, J., & Sanggaria, O. J. (2021). Analisis kekuatan kolom beton bertulang berdasarkan diagram interaksi kolom. *Paulus Civil Engineering Journal*, 3(2), 125–134.
- Rafifah, D., & Clara, A. (2025). Studi analisis penerapan metode arc-length dalam mendeteksi retak awal beton bertulang. *Journal of Infrastructure and Construction Technology*, 3(1), 9–20.
- Sakti, T. R., Karels, D. W., & Cornelius, R. (2022). Analisis kinerja kolom pipih dan kolom konvensional pada bangunan bertingkat rendah. *Jurnal Forum Teknik Sipil*, 1(2), 56–67.
- Tawfik, A. B., Mahfouz, S. Y., & Taher, S. E. D. F. (2021). Nonlinear Abaqus simulations for notched concrete beams. *Materials*, 14(23), 1–17. <https://doi.org/10.3390/ma14237349>
- Utomo, D. S., & Hakim, E. A. (2023). Analisis perbandingan kekuatan kolom dengan variasi bentuk penampang. *Seminar Keinsinyuran*, 8(2), 249–256.
- Warman, A., & Arifuddin, M. (2024). Pemodelan analisis struktur menggunakan aplikasi

berbasis elemen hingga: Artikel review. *Journal of Infrastructure and Construction Technology*, 2(2), 81–89.

Yuniva, T., Sulistyorini, D., & Shulhan, M. A. (2022). Perbandingan kapasitas kolom dengan variasi bentuk penampang (Studi kasus struktur kolom rumah susun di Yogyakarta). *Bangun Rekaprima*, 8(1), 102–109.