

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dalam perancangan struktur, elemen bangunan umumnya dirancang agar memiliki tingkat daktilitas yang memadai sehingga mampu menyerap serta mendisipasikan energi ketika terjadi pergerakan akibat aktivitas seismik atau gempa bumi (Belhocine et al., 2024). Daktilitas yang baik memungkinkan struktur mengalami deformasi tanpa mengalami keruntuhan secara tiba-tiba, sehingga kinerja struktur tetap dapat dipertahankan selama terjadi pembebanan gempa. Oleh karena itu, perencanaan dan evaluasi ketahanan seismik suatu struktur bertujuan untuk menjamin keselamatan jiwa manusia, meminimalkan tingkat kerusakan pada infrastruktur, serta menjaga agar bangunan yang memiliki fungsi penting tetap dapat beroperasi setelah terjadinya gempa (Kuria dan Kegyes-Brassai, 2023). Dengan demikian, kemampuan struktur dalam menyerap energi dan menahan gaya lateral akibat gempa menjadi salah satu kriteria utama yang harus dipenuhi dalam praktik rekayasa struktur modern.

Kolom beton bertulang merupakan salah satu elemen struktural utama pada bangunan yang berperan penting dalam menjaga stabilitas dan keutuhan struktur ketika menerima beban vertikal maupun beban lateral (Kuria dan Kegyes-Brassai, 2023). Dalam praktik konstruksi, pemilihan bentuk penampang kolom, baik bulat maupun persegi, umumnya disesuaikan dengan kebutuhan arsitektural dan tuntutan struktural. Pada kolom berpenampang bulat, tulangan spiral banyak digunakan sebagai elemen pengekan lateral (*lateral confinement*) yang mampu meningkatkan kekuatan tekan serta daktilitas beton secara signifikan. Meskipun demikian, tingkat efektivitas pengekan tersebut sangat dipengaruhi oleh parameter geometri dan susunan tulangan, seperti jarak lilitan (*pitch*) pada kolom bulat maupun penggunaan sengkang pada kolom persegi, yang secara langsung berpengaruh terhadap respons tegangan-regangan saat menerima beban

Namun, kondisi yang sering ditemukan di lapangan menunjukkan bahwa masih banyak struktur beton bertulang, terutama bangunan yang dibangun sebelum diberlakukannya peraturan gempa modern, memiliki tingkat kerentanan yang tinggi terhadap keruntuhan akibat desain dan detail seismik yang tidak memadai (Hwang dan Kim, 2025). Berbagai studi juga menunjukkan bahwa sebagian bangunan eksisting saat ini berada pada kondisi kurang aman karena perencanaan awalnya tidak mengikuti perkembangan atau pembaruan kode seismik yang berlaku (Esskely dan Bousshine, 2024). Salah satu kelemahan yang sering dijumpai adalah kurangnya detail pada elemen kolom, seperti jarak tulangan transversal yang terlalu besar. Kondisi ini dapat menurunkan tingkat daktilitas kolom secara signifikan dan meningkatkan potensi terjadinya kegagalan getas (*brittle failure*), misalnya keruntuhan geser, ketika struktur mengalami pembebanan akibat gempa.

Kerentanan struktur tersebut sering kali berkaitan dengan keterbatasan metode analisis elastis atau analisis linier konvensional dalam menggambarkan perilaku struktur secara menyeluruh. Menurut Kuria dan Kegyes-Brassai (2023), prosedur analisis linier dinilai kurang memadai karena tidak mampu merepresentasikan respons keruntuhan material yang bersifat nonlinier secara akurat. Di sisi lain, pemodelan perilaku geser nonlinier pada elemen beton bertulang dalam perangkat lunak analisis struktur masih menjadi tantangan tersendiri. Apabila aspek ini tidak diperhitungkan dengan baik, hasil analisis dapat menghasilkan estimasi kapasitas struktur yang terlalu tinggi (*overestimation*), sehingga tidak mencerminkan kondisi sebenarnya dari struktur yang mungkin tidak memenuhi persyaratan kinerja yang diharapkan (Hwang dan Kim, 2025). Ketidakmampuan analisis dalam menangkap penurunan kekakuan elemen saat mendekati kondisi keruntuhan inilah yang dapat menyebabkan kegagalan kolom secara tiba-tiba.

Untuk menghindari kesalahan dalam memperkirakan kapasitas struktur, diperlukan evaluasi kinerja struktur dengan menggunakan metode analisis yang lebih menyeluruh dan dapat menggambarkan kondisi sebenarnya dari perilaku struktur. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah analisis *pushover* statik nonlinier. Dibandingkan dengan analisis linier, metode *pushover* memiliki keunggulan karena mampu mempertimbangkan perilaku material yang bersifat nonlinier secara lebih realistis, sehingga prediksi gaya dalam dan deformasi struktur setelah melewati batas elastis dapat diperoleh dengan lebih akurat. Penerapan analisis ini juga menjadi penting ketika dikombinasikan dengan pedoman FEMA 356 untuk menentukan tingkat kinerja struktur (*Performance Level*), seperti *Immediate Occupancy*, *Life Safety*, dan *Collapse Prevention*. Melalui pendekatan ini, kinerja struktur dapat dievaluasi dengan lebih jelas, khususnya dalam menilai apakah batasan *drift ratio* dan rasio kekuatan struktur telah memenuhi kriteria yang disyaratkan (Pratama, 2024).

Meskipun analisis *pushover* statik nonlinier telah banyak digunakan dalam bidang rekayasa kegempaan, masih terdapat kesenjangan penelitian yang cukup jelas terkait objek yang dikaji. Sebagian besar penelitian di Indonesia cenderung menitikberatkan pada evaluasi kinerja seismik secara global pada struktur bangunan bertingkat secara keseluruhan. Beberapa penelitian misalnya meninjau kinerja bangunan fasilitas pendidikan di lingkungan kampus (Reza et al., 2024). Di sisi lain, terdapat pula penelitian yang membahas variasi bentuk kolom, misalnya perbandingan kinerja bangunan dengan kolom berbentuk bulat dan persegi oleh Dewi et al. (2024). Namun, kajian tersebut masih berfokus pada respons global bangunan, khususnya simpangan lateral struktur secara keseluruhan, bukan pada perilaku elemen struktur secara individual. Oleh karena itu, kajian yang secara khusus meneliti distribusi sendi plastis dan tingkat kinerja pada elemen kolom beton bertulang tunggal berpenampang bulat dan persegi menggunakan pedoman FEMA 356 masih relatif terbatas dalam literatur yang ada.

Mengingat perbedaan karakteristik pengeangan antara tulangan spiral pada kolom bulat dan sengkang pada kolom persegi dalam meningkatkan daktilitas serta mencegah keruntuhan tiba-tiba, maka diperlukan suatu pendekatan analisis yang mampu mengevaluasi perilaku kedua tipe elemen tersebut secara mendalam. Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah melalui pemodelan yang mampu mensimulasikan pemberian beban dorong secara bertahap pada struktur. Melalui analisis tersebut, kinerja serta tingkat keamanan elemen-elemen kritis dapat diperkirakan dengan lebih baik sebelum struktur mencapai kondisi keruntuhan. Berdasarkan latar belakang permasalahan, fenomena yang terjadi di lapangan, serta urgensi penelitian tersebut, maka dirumuskan judul penelitian ini yaitu **“Evaluasi Kinerja Kolom Beton Bertulang Berpenampang Bulat Dan Persegi Menggunakan Analisis *Pushover* Statik Nonlinier”**.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka permasalahan penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana perbandingan kurva kapasitas (*capacity curve*) yang dihasilkan dari analisis pushover statik nonlinier antara kolom beton bertulang berpenampang bulat dan persegi?
2. Bagaimana perbedaan tingkat kinerja (*performance level*) pada kolom berpenampang bulat dan persegi berdasarkan kriteria penerimaan yang ditetapkan dalam pedoman FEMA 356?
3. Bagaimana mekanisme pembentukan serta distribusi sendi plastis (*plastic hinge*) pada kedua tipe penampang kolom tersebut saat menerima pembebanan lateral hingga mencapai kondisi ultimit?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dikemukakan, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis perbandingan kurva kapasitas (*capacity curve*) hasil analisis pushover statik nonlinier untuk mengidentifikasi perbedaan perilaku struktural antara kolom beton bertulang berpenampang bulat dan persegi.
2. Menentukan dan membandingkan tingkat kinerja (*performance level*) pada kolom berpenampang bulat dan persegi dengan mengacu pada kriteria penerimaan yang ditetapkan dalam pedoman FEMA 356.
3. Mengidentifikasi mekanisme pembentukan serta distribusi sendi plastis (*plastic hinge*) pada kedua tipe penampang kolom akibat pembebanan lateral hingga mencapai kondisi ultimit.

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan beberapa manfaat sebagai berikut:

1. Penelitian ini diharapkan dapat menambah pemahaman dalam bidang rekayasa struktur, khususnya terkait perilaku kolom beton bertulang dengan penampang bulat dan persegi saat menerima beban lateral. Selain itu, hasil penelitian ini juga dapat menjadi tambahan referensi bagi penelitian selanjutnya yang membahas analisis *pushover* statik nonlinier dan kinerja seismik struktur.
2. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pertimbangan dalam memilih bentuk penampang kolom yang paling efektif dan optimal untuk meningkatkan kinerja struktur terhadap beban lateral.
3. Penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai bahan pembelajaran bagi mahasiswa teknik sipil dalam memahami perbandingan kinerja kolom beton bertulang serta penerapan analisis *pushover* statik nonlinier.

1.5. Batasan Masalah

Untuk memastikan penelitian tetap fokus pada tujuan utama dan tidak melebar ke pembahasan yang tidak relevan, maka penelitian ini dibatasi pada beberapa hal sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya difokuskan pada kolom beton bertulang tunggal dengan dua variasi penampang, yaitu penampang bulat dan penampang persegi.
2. Analisis yang digunakan adalah analisis *pushover* statik nonlinier dengan bantuan perangkat lunak SAP2000.
3. Evaluasi kinerja struktur dilakukan berdasarkan kriteria penerimaan pada pedoman FEMA 356.
4. Parameter yang dianalisis meliputi kurva kapasitas (hubungan antara *base shear* dan *displacement*), tingkat kinerja struktur (*performance level*), serta mekanisme pembentukan sendi plastis pada kolom bulat dan kolom persegi.
5. Pengaruh faktor eksternal seperti kondisi tanah, interaksi tanah dan struktur, dan beban dinamis gempa secara langsung tidak diperhitungkan dalam penelitian ini.
6. Pemodelan struktur dalam penelitian ini dilakukan melalui simulasi numerik menggunakan perangkat lunak tanpa melibatkan pengujian eksperimental di laboratorium.

1.6. Landasan Teori

1.6.1. Gempa Bumi dan Beban Gempa pada Struktur

Gempa bumi yang terjadi akibat pergerakan lempeng tektonik merupakan salah satu faktor utama yang dapat menyebabkan kerusakan pada struktur bangunan. Oleh karena itu, bangunan yang berada di wilayah dengan tingkat aktivitas seismik tinggi harus dirancang dengan kapasitas seismik yang memadai. Kapasitas seismik merupakan kemampuan suatu struktur untuk menahan serta merespons beban gempa tanpa mengalami keruntuhan yang membahayakan keselamatan. Struktur bangunan yang memiliki kapasitas seismik yang baik umumnya menunjukkan perilaku daktil, yaitu mampu mengalami deformasi yang

cukup besar sebelum mengalami kegagalan. Perilaku daktil tersebut sangat penting karena memungkinkan struktur menyerap dan mendisipasikan energi gempa, sehingga dapat mengurangi risiko keruntuhan secara tiba-tiba (Darmansyah et al., 2024).

1.6.2. Kolom Beton Bertulang

Kolom adalah elemen struktural vertikal yang berfungsi menahan beban aksial dari bangunan dan menyalurkannya ke fondasi. Selain menahan beban aksial, kolom juga memikul momen ultimit akibat distribusi beban lateral atau interaksi antar elemen struktur, sehingga bekerja secara kombinasi (Dewi et al., 2024). Kolom merupakan elemen kritis dalam suatu bangunan, karena keruntuhannya dapat menjadi titik lemah yang memicu kerusakan lantai dan bahkan keruntuhan total bangunan.

1.6.3. Perilaku Nonlinier Struktur Beton Bertulang

Perilaku nonlinier pada elemen struktur menunjukkan kemampuan elemen tersebut untuk mengalami deformasi yang melebihi batas elastisnya. Kemampuan ini diukur melalui daktilitas, yaitu kapasitas suatu struktur untuk menahan deformasi pascaelastik secara berulang sebagai respons terhadap pembebanan gempa (Darmansyah et al., 2024). Memahami perilaku nonlinier sangat penting dalam evaluasi struktur, karena keruntuhan pada satu kolom dapat menjadi titik kritis yang memicu kerusakan lantai dan berpotensi menyebabkan keruntuhan total bangunan.

Efektivitas pengekangan (*confinement*) pada kolom beton bertulang sangat dipengaruhi oleh geometri penampangnya. Kolom dengan penampang bulat umumnya menunjukkan peningkatan kapasitas tekan dan daktilitas yang lebih signifikan dibandingkan dengan kolom berpenampang persegi (Hussain et al., 2024). Hal ini disebabkan oleh distribusi tekanan kekang pada penampang bulat yang bekerja secara merata dan kontinu di sepanjang keliling beton, sehingga mampu menunda keruntuhan inti beton secara lebih optimal. Sebaliknya, pada kolom berpenampang persegi, efektivitas pengekangan cenderung menurun akibat adanya konsentrasi tegangan di bagian sudut penampang, yang dapat memicu kerusakan lebih awal pada selimut beton sebelum inti beton mencapai kapasitas ultimitnya. Perbedaan distribusi tegangan tersebut turut memengaruhi mekanisme pembentukan sendi plastis (*plastic hinge*), di mana penampang dengan pengekangan yang lebih baik cenderung menunjukkan redistribusi momen yang lebih stabil. Oleh karena itu, analisis pushover statik nonlinier menjadi metode yang penting untuk mengevaluasi dan membandingkan respons struktural kedua jenis penampang tersebut hingga mencapai batas kapasitas ultimitnya.

1.6.4. Beban

Beban yang bekerja pada struktur gedung meliputi beban mati, beban hidup, beban angin, beban gempa, beban air, serta beban khusus lainnya seperti getaran

mesin dan kejut listrik. Besarnya dan jenis beban yang diperhitungkan dalam perencanaan struktur bergantung pada fungsi ruang, lokasi bangunan, bentuk, tingkat kekakuan, massa, serta tinggi gedung (Pamungkas dan Harianti, 2018). Namun, dalam penelitian ini yang hanya berfokus pada analisis kolom tunggal, jenis beban yang digunakan dibatasi pada 100% beban mati saja dan beban hidup tidak diperhitungkan karena tidak terdapat lantai yang digunakan untuk penyimpanan.

1.6.5. Analisis *Pushover* Statik Nonlinier

Analisis pushover adalah metode statik nonlinier di mana elemen struktur diberikan beban aksial konstan, lalu secara bertahap dikenai beban lateral yang terus meningkat. Keunggulan metode ini terletak pada kemampuannya memprediksi respons seismik struktur, terutama dalam menggambarkan perilaku elemen saat melewati batas elastis. Hasil analisis divisualisasikan melalui kurva kapasitas (*pushover curve*), yang menunjukkan hubungan antara perpindahan pada titik kontrol dan gaya geser dasar (*base shear*) yang bekerja pada struktur (Esskely dan Bousshine, 2024). Dalam penelitian ini, pengamatan difokuskan pada kolom tunggal dengan titik kontrol yang ditempatkan di ujung atas kolom.

1.6.6. Metode Koefisien Perpindahan (FEMA 356)

Metode koefisien perpindahan merupakan pendekatan yang digunakan dalam FEMA 356 (*Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*) untuk melakukan analisis statik nonlinier. Pada metode ini, nilai koefisien C_0 , C_1 , C_2 , dan C_3 disesuaikan hingga diperoleh perpindahan global maksimum, baik dalam zona elastis maupun inelastis, yang disebut target *displacement* (δ_T). Perhitungan dimulai dengan menentukan waktu getar efektif (T_e), yang mencerminkan kondisi inelastis dari struktur bangunan. Nilai δ_T dapat diperoleh dengan persamaan berikut.

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

Keterangan:

- T_e = Waktu getar alami efektif memperhitungkan kondisi inelastis.
- C_0 = Faktor modifikasi, menghubungkan perpindahan *spectral* sistem *Single Degree of Freedom* (SDOF) ekuivalen dengan perpindahan atap pada sistem bangunan *Multiple Degrees of Freedom* (MDOF).
- C_1 = Faktor modifikasi, menghubungkan perpindahan inelastis maksimum dengan perpindahan yang dihitung dari respon *elastic linear*.
- C_2 = Faktor modifikasi, untuk memperhitungkan efek *pinching* beban deformasi akibat degradasi kekakuan dan kekuatan maksimum.
- C_3 = Faktor modifikasi, untuk memperhitungkan kenaikan lateral akibat efek P-delta.

- S_a = Respon spektrum percepatan desain.
- g = Percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/det}^2$).

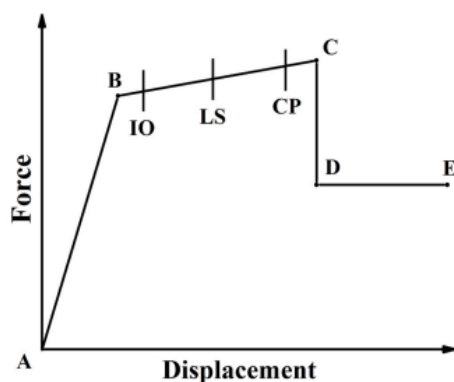
Perlu diketahui bahwa nilai-nilai dari parameter tersebut diatas dapat diperoleh setelah *run analysis* pada program SAP2000. Namun, jika yang dianalisis adalah struktur bangunan maka nilai faktor modifikasi C_0 , C_1 , C_2 , dan C_3 dapat dilihat secara lengkap pada FEMA 356.

1.6.7. Kurva Kapasitas

Kurva kapasitas (*capacity curve*) adalah representasi grafis yang menunjukkan hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dan perpindahan lateral (*displacement*) pada struktur. Kurva ini menjadi alat penting untuk mengevaluasi respons inelastis bangunan terhadap beban lateral, karena dapat memetakan sejauh mana struktur mampu menahan gaya sebelum mencapai kondisi keruntuhan. Dalam penelitian yang berfokus pada kolom beton bertulang dengan penampang bulat dan persegi ini, kurva kapasitas digunakan untuk menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan atap (*roof displacement*), sehingga perilaku daktil kolom dapat dianalisis secara spesifik. Dengan cara ini, kurva kapasitas tidak hanya menunjukkan kapasitas keseluruhan struktur, tetapi juga membantu mengidentifikasi titik-titik kritis di mana sendi plastis terbentuk, memberikan wawasan mengenai distribusi deformasi dan kemampuan kolom bulat dan persegi menyerap energi gempa sebelum tulangan utama mengalami tekuk (Raudah et al., 2025).

1.6.8. Sendi Plastis

Sendi plastis (*Plastic Hinge*) merupakan titik di mana kolom tidak lagi mampu menahan gaya internal secara elastis. Pemodelan sendi ini digunakan untuk menggambarkan perilaku nonlinier kolom, baik dalam hubungan gaya-perpindahan maupun momen-rotasi, dan dapat ditempatkan di lokasi-lokasi tertentu sepanjang elemen kolom (Dewi et al., 2024). Pada kolom beton bertulang, tipe sendi yang digunakan adalah *default* P-M2-M3 pada program SAP2000, yang mempertimbangkan interaksi antara gaya aksial dan momen melalui diagram P-M. Dengan pemodelan ini, kolom dapat menunjukkan pembentukan sendi plastis secara realistis, sehingga perilaku inelastis dan distribusi deformasi akibat pembebanan lateral dapat dianalisis secara akurat. Sendi plastis diasumsikan berada di kedua ujung kolom, sesuai lokasi kritis di mana deformasi maksimum diperkirakan terjadi.



Gambar 1. Model Sendi Plastis Kolom

Sumber: Yang et al., 2023.

Hubungan antara gaya dan perpindahan ditunjukkan pada Gambar 1, yang menggambarkan model sendi plastis sesuai pedoman FEMA 356. Grafik ini juga berlaku untuk hubungan antara momen dan rotasi. Properti sendi plastis (*hinge properties*) dianalisis menggunakan program SAP2000 melalui fitur *automatic hinge*, dengan mempertimbangkan jenis material dan kriteria penerimaan yang digunakan. Untuk kolom beton, kriteria penerimaan ini mengacu pada Tabel 6-8 FEMA 356, sehingga pemodelan sendi plastis dapat merepresentasikan perilaku inelastis kolom secara akurat.

Pada program SAP2000, warna untuk setiap kondisi sendi plastis adalah sebagai berikut.

Tabel 1. Keterangan Warna Pada Titik Sendi Plastis

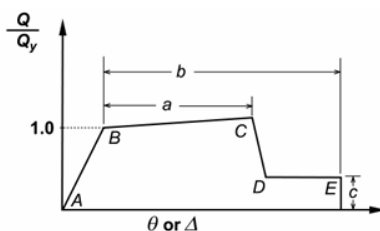
Warna	Keterangan	Penjelasan
	B	Menunjukkan batas linier sebelum terjadi pelelehan awal struktur
	IO	Kerusakan sangat kecil dan kekakuan struktur masih mendekati kondisi awal sebelum gempa
	LS	Kerusakan ringan hingga sedang, kekakuan menurun, namun kapasitas terhadap keruntuhan masih memadai.

	CP	Kerusakan berat yang menyebabkan penurunan signifikan pada kekuatan dan kekakuan struktur
	C	Batas maksimum gaya geser yang dapat ditahan struktur
	D	Degradasi kekuatan signifikan yang membuat struktur tidak stabil dan mendekati keruntuhan
	E	Struktur tidak lagi mampu menahan gaya geser dan mengalami keruntuhan

Sumber: Syahira & Jamal, 2023.

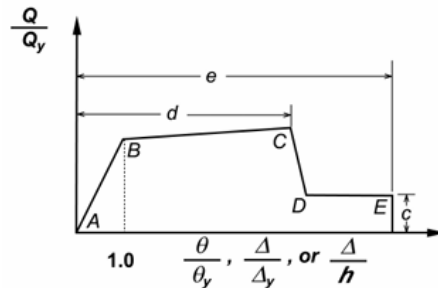
1.6.9. Tingkat Kinerja Struktur dan Kriteria Penerimaan FEMA 356

FEMA 356 (2000) menetapkan kriteria penerimaan untuk komponen struktur dalam prosedur nonlinier yang dikendalikan oleh deformasi, dengan fokus pada besarnya deformasi di titik-titik tertentu pada kurva hubungan antara gaya dan deformasi. Berdasarkan panduan ini, kategori kinerja tertentu digunakan sebagai tolak ukur untuk menilai seberapa baik suatu struktur mampu menahan beban gempa sebelum mencapai kondisi kritis. Kategori kinerja tersebut kemudian digambarkan pada kurva hasil analisis, sehingga jelas batas perilaku struktur sesuai dengan tingkat kerusakan yang terjadi dan kemampuan struktur untuk tetap berfungsi setelah gempa. Kurva yang menunjukkan hubungan antara gaya dan deformasi ditampilkan pada Gambar 2 dan Gambar 3, sedangkan kategori tingkat kinerja struktur dapat dilihat pada Gambar 4 berikut.



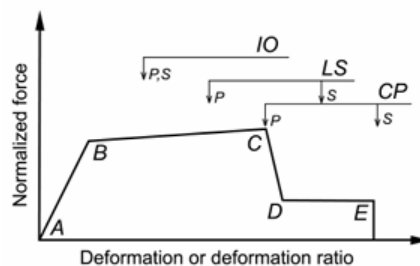
Gambar 2. Kurva dengan Deformasi

Sumber: FEMA 356, 2000.



Gambar 3. Kurva dengan Rasio Deformasi

Sumber: FEMA 356, 2000.



Gambar 4. Level Kinerja Struktur pada Kurva

Sumber: FEMA 356, 2000.

Dari Gambar 4, terlihat bahwa tingkat kinerja struktur ditandai pada titik-titik dan batas tertentu pada kurva, mencakup *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS), dan *Collapse Prevention* (CP). Setiap level kinerja ini dijelaskan secara rinci dalam Tabel 2, sementara batas nilai rasio simpangan (*drift ratio*) untuk masing-masing level kinerja struktur menurut FEMA 356 dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 2. Tingkat Kinerja Struktural menurut FEMA 356

Tingkat Kinerja	Deskripsi
<i>Operational</i>	Tidak ada kerusakan berarti pada struktur dan non-struktur, sehingga bangunan tetap berfungsi.
<i>Immediate Occupancy</i> (IO)	Tidak terdapat kerusakan yang berarti pada komponen struktural maupun non-struktural. Tidak terjadi pergeseran permanen pada bangunan, sedikit retak, serta semua sistem penting pada gedung dapat beroperasi dengan normal.
<i>Life Safety</i> (LS)	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.
---------------------------------	--

Sumber: Wiryadi et al., 2022.

Tabel 3. Batasan Simpangan Tingkat Kinerja Struktur Berdasarkan FEMA 356

Tingkat Kinerja	<i>Drift Actual</i>	Keterangan
<i>Immediate Occupancy</i>	1.0	<i>Transient</i>
<i>Life Safety</i>	2.0	<i>Transient</i>
	1.0	<i>Permanent</i>
<i>Collapse Prevention</i>	4.0	<i>Transient</i> atau <i>Permanent</i>

Sumber: FEMA 356, 2000.

1.6.10. Analisis dengan SAP2000

Menurut *Computers and Structures, Inc.* (2004), SAP2000 adalah perangkat lunak yang digunakan untuk analisis dan perancangan struktur tiga dimensi dengan sistem yang terintegrasi, mencakup tahapan pemodelan, pelaksanaan analisis, hingga evaluasi serta optimasi desain dalam satu antarmuka grafis. Program ini mampu mengakomodasi berbagai jenis analisis, mulai dari analisis statik linear hingga analisis nonlinier yang lebih kompleks, seperti pushover, yang digunakan untuk mengkaji pengaruh karakteristik material dan perubahan geometri terhadap kinerja struktur. Melalui konsep pemodelan berbasis objek, pengguna dapat merepresentasikan elemen struktur sesuai kondisi aktualnya, yang kemudian secara otomatis diubah menjadi model elemen hingga untuk keperluan analisis numerik. Selain itu, SAP2000 juga mendukung berbagai standar desain internasional, sehingga mempermudah proses perhitungan kebutuhan tulangan pada elemen beton bertulang secara terintegrasi dalam satu sistem.

Hasil analisis pushover statik nonlinier pada SAP2000 dapat ditampilkan secara visual melalui fitur *function plots* dalam bentuk kurva kapasitas, yang menunjukkan hubungan antara perpindahan titik kontrol dengan gaya geser dasar struktur. Selain itu, hasil analisis juga dapat ditampilkan dalam berbagai bentuk visual seperti kontur tegangan dan diagram gaya dalam. Seluruh data, baik model maupun hasil analisis, tersusun dalam format tabel yang sistematis sehingga mudah untuk ditinjau dan diolah kembali. Untuk memahami respons struktur pada setiap tahapan pembebanan, pengguna dapat memanfaatkan fitur navigasi yang tersedia untuk menelusuri hasil analisis secara bertahap. Evaluasi yang lebih detail terhadap setiap elemen, seperti geometri, pembebanan, hingga hasil analisis spesifik, dapat dilakukan dengan memilih objek secara langsung pada tampilan, sehingga mempermudah dalam menilai kinerja struktur secara menyeluruh.

1.7. Penelitian Terdahulu

Kajian mengenai kinerja elemen vertikal dalam sistem penahan gempa terus berkembang, terutama yang menyoroti pengaruh bentuk penampang kolom. Dewi et al. (2024) melalui analisis perbandingan menunjukkan bahwa geometri kolom memberikan pengaruh yang berbeda terhadap kekakuan lateral struktur. Kolom persegi cenderung lebih kaku dalam menahan beban pada arah X, sedangkan kolom bulat memiliki kinerja kekakuan yang lebih baik pada arah Y. Temuan ini juga didukung oleh penelitian Fachri et al. (2023) yang menyatakan bahwa bentuk penampang berpengaruh langsung terhadap besar simpangan struktur, di mana kolom persegi menunjukkan nilai simpangan yang lebih kecil pada arah tertentu dibandingkan kolom bulat.

Selain kekakuan, kemampuan kolom dalam menahan beban juga menjadi faktor penting dalam perencanaan struktur. Yuniva et al. (2022) melalui studi perbandingan menunjukkan bahwa kolom berpenampang lingkaran memiliki efisiensi kapasitas momen yang lebih baik dibandingkan dengan kolom berpenampang persegi maupun persegi panjang. Sementara itu, Esskely dan Bousshine (2024) menambahkan bahwa tingkat kerentanan terhadap gempa tidak hanya dipengaruhi oleh bentuk penampang, tetapi juga oleh rasio tulangan dalam kolom, di mana berkurangnya jumlah tulangan dapat menurunkan kinerja struktur secara signifikan saat menerima beban lateral.

Metode analisis nonlinier saat ini semakin banyak digunakan karena mampu menggambarkan perilaku struktur yang lebih mendekati kondisi sebenarnya di lapangan. Belhocine et al. (2024) menyatakan bahwa analisis statik nonlinier dapat memberikan perkiraan kegagalan yang lebih akurat dibandingkan pendekatan elastis konvensional. Selain itu, Afiah et al. (2022) menunjukkan bahwa metode ini efektif digunakan untuk menentukan tingkat kinerja bangunan dengan mengacu pada standar FEMA 356 dan ATC-40, di mana hasil evaluasi umumnya menempatkan struktur beton bertulang pada kategori *Damage Control*.

Evaluasi pada daerah dengan tingkat risiko gempa yang tinggi menunjukkan bahwa susunan struktur dan mutu material sangat berperan dalam menentukan apakah bangunan dapat mencapai target kinerja *Immediate Occupancy*. Hal ini ditunjukkan oleh Pratama (2024). Selain itu, Reza et al. (2024) juga menekankan pentingnya melakukan evaluasi pada bangunan yang sudah ada melalui analisis pushover. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa elemen kolom, khususnya pada bangunan pendidikan, masih memenuhi ketentuan terbaru terkait ketahanan gempa, sehingga keamanan pengguna bangunan tetap terjaga.

Tabel 4. Ringkasan Penelitian Terdahulu

Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian	Metode Analisis	Hasil Utama	Keterbatasan (<i>Research Gap</i>)
Yuniva et al., 2022	Perbandingan Kapasitas Kolom dengan Variasi Bentuk Penampang	Komparasi perhitungan manual dengan pemodelan <i>software</i> SP Column merujuk pada standar SRPMK.	Kolom bulat bersengkang spiral lebih efisien menahan momen karena pengekangan lebih baik.	Kajian hanya berfokus pada kekuatan penampang saja, belum meninjau perilaku plastis struktur secara keseluruhan.
Afiah et al., 2022	Evaluasi Kinerja Struktur Beton Bertulang dengan <i>Pushover Analysis</i> Berdasarkan ATC-40, FEMA 356 dan FEMA 440	Penilaian performa berbasis target perpindahan menggunakan metodologi SNI 1726:2019.	Gedung berkategori <i>Damage Control</i> dinilai aman karena memiliki ketangguhan yang cukup untuk menahan guncangan gempa.	Tidak menyertakan variabel perbandingan bentuk kolom, hanya berfokus pada evaluasi kapasitas gedung yang sudah ada.
Fachri et al., 2023	Analisis Perbandingan Perilaku Struktur dengan Variasi Bentuk Penampang Kolom Beton Bertulang	Analisis dinamik terkomputerisasi untuk memantau deformasi dan gaya dalam struktur.	Kolom persegi lebih efektif dalam mengurangi goyangan atau pergeseran lantai pada arah X dibandingkan kolom bulat.	Evaluasi lebih banyak membahas aspek perpindahan gaya, belum menyentuh penentuan level kinerja gedung secara mendalam.
Dewi et al., 2024	Perbandingan Kinerja Struktur Kolom Bulat dan Kolom Persegi Beton Bertulang	Pendekatan kuantitatif melalui simulasi SAP2000 untuk	Kolom persegi lebih kaku di sumbu X, sedangkan kolom bulat	Cakupan penelitian terbatas pada satu objek gedung dengan denah yang seragam.

	Terhadap Beban Gempa dengan Analisis Pushover	menguji respon nonlinier struktur.	lebih unggul di sumbu Y.	
Esskely & Bousshine, 2024	<i>Pushover Analysis of Regular Reinforced Concrete Buildings with Different Column Section Designs</i>	Penerapan prosedur <i>pushover</i> statik nonlinier berdasarkan parameter Eurocode 8 dan FEMA 356.	Pengurangan tulangan kolom meningkatkan kerentanan struktur terhadap beban seismik.	Model uji berbentuk simetris, sehingga belum menggambarkan kondisi gedung dengan bentuk tidak beraturan.
Belhocine et al., 2024	<i>Nonlinear Analysis Methods for Reinforced Concrete Structural Elements Subjected to Static and Dynamic Loads</i>	Studi komparatif antara pemodelan statik dan dinamik pada elemen struktur beton.	Analisis nonlinier lebih akurat dari metode linear.	Penelitiannya masih berfokus pada skala elemen tunggal (mikro), belum diuji pada sistem bangunan kompleks (makro).
Pratama, 2024	<i>Evaluation of Reinforced Concrete Structural Performance under Earthquake Loads Based on Nonlinear Analysis in Lombok</i>	Gabungan antara observasi lapangan di daerah terdampak gempa dengan pemodelan numerik.	Geometri kolom dan kualitas material sangat menentukan kemampuan gedung dalam menahan kerusakan.	Hasil studi sangat dipengaruhi oleh karakteristik material lokal di wilayah tertentu.
Reza et al., 2024	Evaluasi Performa Struktural Gedung Fakultas MIPA Universitas Jenderal Soedirman Terhadap Gempa	Deskriptif kuantitatif menggunakan kurva kapasitas untuk memverifikasi kekuatan struktur eksisting.	Struktur bangunan saat ini dinilai masih sangat layak dan aman menurut standar peraturan gempa terbaru yang berlaku.	Belum mengeksplorasi skenario penguatan (<i>retrofitting</i>) atau modifikasi bentuk kolom untuk meningkatkan kinerja.

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1. Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif melalui Simulasi Numerik (*Numerical Simulation*) untuk mengevaluasi kinerja seismik kolom beton bertulang secara terukur. Melalui pemodelan komputasional berbasis Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*), penelitian ini mentransformasikan perilaku fisik struktur ke dalam perhitungan matematis yang komprehensif.

Proses analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak SAP2000 dengan metode Analisis *Pushover* Statik Nonlinier (*Nonlinear Static Pushover Analysis*). Metode ini memungkinkan identifikasi respons struktur dari fase elastis hingga mencapai kondisi inelastis untuk memprediksi potensi keruntuhan saat terjadi beban gempa. Data numerik yang dihasilkan kemudian dievaluasi berdasarkan kriteria standar FEMA 356, sehingga diperoleh kesimpulan yang akurat mengenai efektivitas kekuatan dan level kinerja seismik kolom yang diteliti.

2.2. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini bersifat studi literatur dan pemodelan numerik, sehingga aktivitas penelitian difokuskan pada pengolahan data menggunakan perangkat lunak SAP2000. Seluruh rangkaian pemodelan dan analisis data dilakukan di Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Data sekunder yang digunakan sebagai input pemodelan bersumber dari penelitian tingkat Doktor (S3) berupa gambar kerja pada Laboratorium Struktur dan Bahan Universitas Hasanuddin.

Waktu penelitian dilaksanakan selama enam bulan, terhitung mulai bulan November 2025 sampai dengan April 2026, yang meliputi tahap pengumpulan data sekunder, pemodelan struktur, analisis data, hingga penyusunan laporan akhir.

2.3. Objek Penelitian

Objek penelitian ini berfokus pada analisis perbandingan kinerja komponen kolom tunggal beton bertulang dengan penampang bulat dan persegi. Kedua geometri penampang tersebut ditinjau sebagai elemen struktural kritis untuk mengevaluasi perbedaan perilaku daktilitas dan kapasitas lateralnya. Model yang dianalisis mencakup kolom bulat berdiameter 340 mm dan kolom persegi berdimensi 300 x 300 mm.

2.4. Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan secara sistematis melalui dua pendekatan utama, yaitu studi literatur dan pemanfaatan data sekunder

dari studi eksperimental. Penjelasan detail mengenai kedua metode tersebut adalah sebagai berikut:

2.4.1. Studi Literatur

Studi literatur dalam penelitian ini dilakukan melalui pengumpulan data dan informasi dari berbagai sumber ilmiah yang relevan dengan topik kajian. Sumber-sumber tersebut mencakup jurnal ilmiah atau buku yang membahas mengenai analisis *pushover*, rekayasa gempa, dan standar desain beton bertulang seperti SNI 1726 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa. Selain itu, penelitian ini juga merujuk pada pedoman evaluasi kinerja struktur tahan gempa internasional, yakni FEMA 356 (*Federal Emergency Management Agency*), sebagai acuan dalam menilai kinerja seismik dan tingkat keamanan struktur secara komprehensif.

2.4.2. Data Sekunder

Data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari eksperimen penelitian tingkat Doktor (S3) yang dilaksanakan di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Data tersebut berupa gambar kerja yang memuat parameter-parameter utama yang diperlukan untuk proses pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak SAP2000, meliputi dimensi kolom, serta detail penulangan longitudinal dan transversal. Selain itu, data juga mencakup mutu material beton (f'_c) dan baja tulangan (f_y). Perlu dicatat bahwa dalam penelitian ini, penulis tidak melakukan pengujian eksperimental secara langsung di laboratorium, melainkan menggunakan data input dan hasil keluaran dari analisis *pushover* statik nonlinier pada SAP2000, yang didasarkan pada data eksperimen yang dilakukan di laboratorium.

2.5. Data Kolom

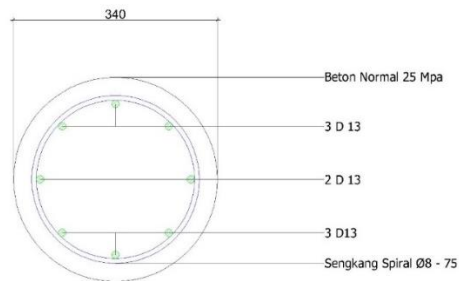
Pada penelitian ini, data yang digunakan adalah sebagai berikut:

a. Kolom Bulat

- Dimensi Kolom
 - Tinggi : 1465 mm
 - Diameter : 340 mm
- Mutu Beton : 25 MPa
- Selimut Beton : 40 mm
- Mutu Baja
 - Tulangan Longitudinal BJTS 420 dengan $F_y = 420$ MPa dan $F_u = 525$ MPa
 - Tulangan Transversal BJTP 280 dengan $F_y = 280$ MPa dan $F_u = 350$ MPa
- Berat Volume Beton : 24 kN/m³
- Berat Volume Baja : 78.5 kN/m³
- Modulus Elastisitas (E) Beton : 23500 MPa

- Modulus Elastisitas (E) Baja : 200000 MPa

Untuk detail kolom bulat dapat dilihat pada gambar berikut:

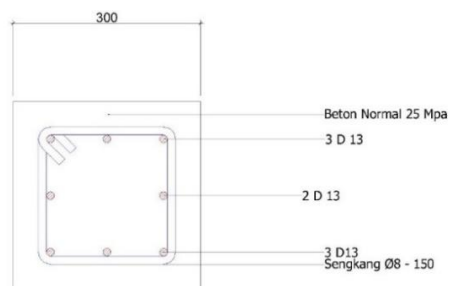


Gambar 5. Detail Kolom Bulat

b. Kolom Persegi

- Dimensi Kolom
 - Tinggi : 1465 mm
 - Panjang : 300 mm
 - Lebar : 300 mm
- Mutu Beton : 25 MPa
- Selimut Beton : 40 mm
- Mutu Baja
 - Tulangan Longitudinal BJTS 420 dengan $F_y = 420$ MPa dan $F_u = 525$ MPa
 - Tulangan Transversal BJTP 280 dengan $F_y = 280$ MPa dan $F_u = 350$ MPa
- Berat Volume Beton : 24 kN/m³
- Berat Volume Baja : 78.5 kN/m³
- Modulus Elastisitas (E) Beton : 23500 MPa
- Modulus Elastisitas (E) Baja : 200000 MPa

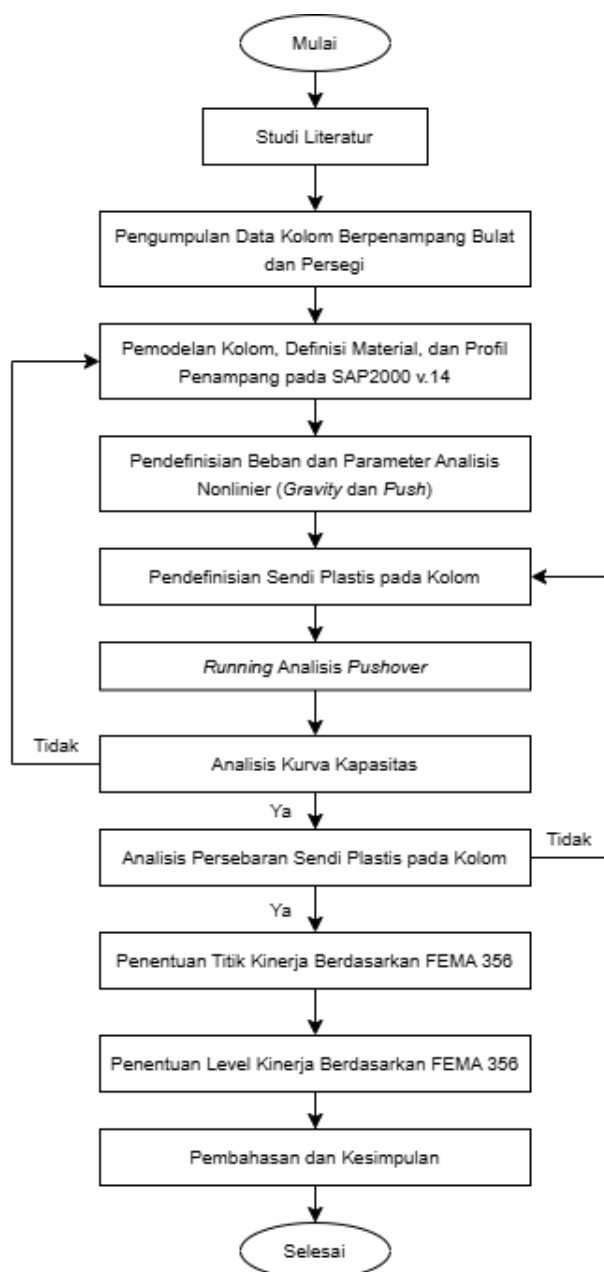
Untuk detail kolom persegi dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 6. Detail Kolom Persegi

2.6. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui tahapan-tahapan yang tersusun secara runtut dan sistematis, dengan penekanan utama pada proses pemodelan serta analisis numerik. Alur keseluruhan penelitian tersebut dapat dilihat dengan jelas pada diagram alir di bawah ini:



Gambar 7. Diagram Alir Penelitian

2.7. Perangkat Lunak yang Digunakan

Dalam penelitian ini, digunakan perangkat lunak SAP2000 v.14 sebagai alat utama untuk mendukung proses pemodelan dan analisis struktur. Program ini berperan dalam menyederhanakan perhitungan teknis yang rumit menjadi simulasi numerik yang lebih sistematis dan terukur. Melalui penggunaan SAP2000, perilaku kolom dapat dianalisis secara lebih mendalam pada setiap tahapan analisis struktur, sehingga proses penyelesaian permasalahan dalam penelitian ini menjadi lebih efektif dan memiliki tingkat ketelitian yang lebih baik.

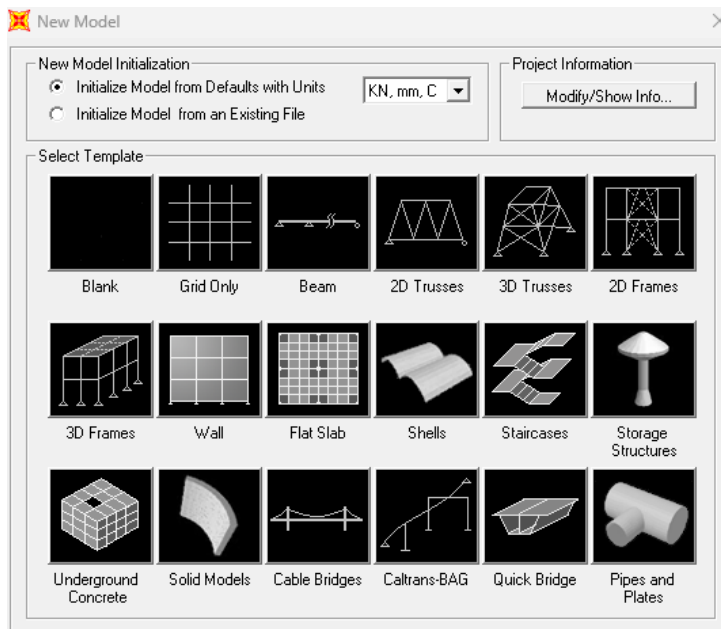
2.8. Tahapan Analisis Menggunakan SAP2000

Berbeda dengan proses desain yang dimulai dari penentuan dimensi awal, penelitian ini merupakan proses evaluasi terhadap elemen struktur yang spesifikasinya telah ditetapkan. Seluruh data dimensi, detail penulangan, serta properti material pada kolom tunggal ini diperoleh langsung dari gambar kerja riset doctoral (S3). Data tersebut berfungsi sebagai parameter input yang bersifat tetap untuk kemudian dievaluasi kinerjanya melalui simulasi numerik, dalam hal ini menggunakan SAP2000. Berikut merupakan langkah-langkah analisis menggunakan SAP2000 untuk kolom berpenampang bulat dan berpenampang persegi yang mana dalam pemodelannya bisa dilakukan menggunakan satu *file* saja atau secara bergantian dengan dua *file* yang berbeda.

2.8.1. Pemodelan Baru (*New Model*)

Tahap awal dalam proses analisis ini adalah melakukan pemodelan geometri kolom tunggal. Pemodelan dimulai saat membuka aplikasi atau dengan mengaktifkan perintah *New Model* melalui menu utama maupun kombinasi tombol *Control-N* pada papan ketik. Langkah ini bertujuan untuk menetapkan parameter dasar serta satuan yang akan digunakan sebelum mendefinisikan dimensi penampang kolom secara mendetail.

Pada jendela *New Model Initialization*, satuan yang digunakan ditetapkan menjadi kN, mm, C untuk memudahkan input dimensi kolom dan besaran gaya sesuai dengan data sekunder. Pemilihan *template* dilakukan dengan menggunakan opsi *Grid Only* untuk membentuk kerangka dasar kolom tunggal secara manual.



Gambar 8. Inisialisasi Model dan Pengaturan Satuan

Setelah pemilihan *template*, tahap berikutnya adalah melakukan konfigurasi garis kisi (garis bantu imajiner) melalui jendela *Quick Grid Lines*. Mengingat objek penelitian ini berfokus pada kolom tunggal, pengaturan sumbu vertikal (sumbu Z) harus diselaraskan secara presisi dengan tinggi kolom yang diteliti, yaitu 1465 mm. Detail pengaturannya adalah sebagai berikut:

- *Number of Grid Lines*

Pada arah Z ditetapkan sebanyak 2 garis kisi guna mendefinisikan posisi tumpuan (dasar) dan titik puncak kolom.

- *Grid Spacing*

Input pada arah Z diisi dengan nilai 1465, yang merujuk langsung pada dimensi tinggi kolom.

- *First Grid Line Location*

Lokasi garis kisi pertama ditetapkan pada titik koordinat global (0, 0, 0) sebagai referensi acuan awal pemodelan.

Quick Grid Lines

Cartesian | Cylindrical

Coordinate System Name
GLOBAL

Number of Grid Lines

X direction 1

Y direction 1

Z direction 2

Grid Spacing

X direction 1000

Y direction 1000

Z direction 1465

First Grid Line Location

X direction 0.

Y direction 0.

Z direction 0.

OK Cancel

Gambar 9. Pengaturan *Quick Grid Lines*

Tidak ada tahapan yang membedakan baik kolom berpenampang bulat maupun berpenampang persegi pada tahapan ini karena kedua kolom tersebut memiliki tinggi yang sama yakni 1465 mm.

2.8.2. Definisi Material

Setelah tahap inialisasi model selesai, langkah berikutnya adalah mendefinisikan material. Tahap pendefinisian material bertujuan untuk menetapkan jenis material yang akan digunakan dalam pemodelan. Dalam hal ini, kedua jenis penampang kolom menggunakan jenis material yang sama.

1. Beton

Klik menu *Define > Materials > Add New Material*. Isi spesifikasi material beton yang akan digunakan sesuai dengan data yang ada.

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: BETON F'C 25 MPA

Material Type: Concrete

Material Notes: [Modify/Show Notes...](#)

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 2.400E-08

Mass per Unit Volume: 2.447E-12

Units: KN, mm, C

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 23500

Poisson's Ratio, U: 0.2

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1.170E-05

Shear Modulus, G: 9791.6667

Other Properties for Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, f_c: 25

☐ Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor:

☐ Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Gambar 10. Definisi Material Beton Bertulang

2. Baja

Klik kembali menu *Add New Material* untuk mendefinisikan material baja tulangan longitudinal dan tulangan transversal (senggang).

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: TULANGAN LONGITUDINAL

Material Type: Rebar

Material Notes: [Modify/Show Notes...](#)

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 7.850E-08

Mass per Unit Volume: 8.005E-12

Units: KN, mm, C

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 200000

Poisson's Ratio, U: 0.3

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1.170E-05

Shear Modulus, G: 76923.08

Other Properties for Rebar Materials

Minimum Yield Stress, F_y: 420

Minimum Tensile Stress, F_u: 525

Expected Yield Stress, F_{ye}: 462

Expected Tensile Stress, F_{ue}: 577.5

☐ Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Gambar 11. Definisi Material Baja Tulangan Longitudinal

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: TULANGAN TRANSVERSAL

Material Type: Rebar

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 7.850E-08

Mass per Unit Volume: 8.005E-12

Units: KN, mm, C

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 200000

Poisson's Ratio, U: 0.3

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1.170E-05

Shear Modulus, G: 76923.08

Other Properties for Rebar Materials

Minimum Yield Stress, Fy: 280

Minimum Tensile Stress, Fu: 350

Expected Yield Stress, Fye: 308

Expected Tensile Stress, Fue: 385

☐ Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Gambar 12. Definisi Material Baja Tulangan Transversal

2.8.3. Definisi Penampang Kolom

Pendefinisian struktur kolom ini dilakukan dengan memasukkan data dimensi dari struktur kolom ke dalam SAP2000 sesuai dengan data dimensi yang telah dimiliki. Pendefinisian struktur kolom dilakukan dengan cara klik menu *Define > Section Properties > Frame Sections > Add New Property*. Setelah itu, akan muncul *Frame Section Property Type*, kemudian pilih *Concrete*. Untuk kolom berpenampang bulat, pilih *Circular*. Kemudian akan muncul *Circle Section* dan isi bagian *Section Name*, *Material* (yang telah didefinisikan sebelumnya), dan Diameter sesuai data yang telah ada. Selanjutnya, klik *Concrete Reinforcement* untuk memasukkan detail penulangan pada kolom. Untuk detail *input* parameternya dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

Gambar 13. Detail Dimensi Kolom Berpenampang Bulat

Gambar 14. Detail Parameter Penulangan Kolom Berpenampang Bulat

Untuk kolom berpenampang persegi, pilih *Rectangular*. Kemudian akan muncul *Rectangular Section* dan isi bagian *Section Name*, *Material* (yang telah didefinisikan sebelumnya), dan *Dimensions* sesuai data yang telah ada. Selanjutnya, klik *Concrete Reinforcement* untuk memasukkan detail penulangan pada kolom. Untuk detail *input* parameternya dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

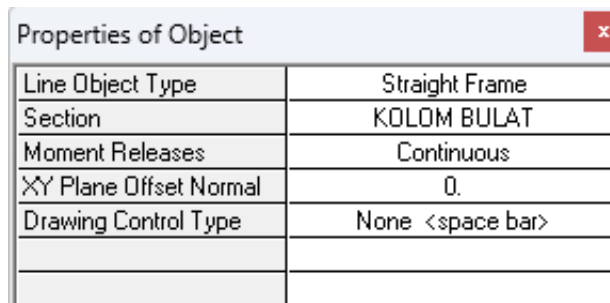
Gambar 15. Detail Dimensi Kolom Berpenampang Persegi

Gambar 16. Detail Parameter Penulangan Kolom Berpenampang Persegi

2.8.4. Pemodelan Elemen Kolom

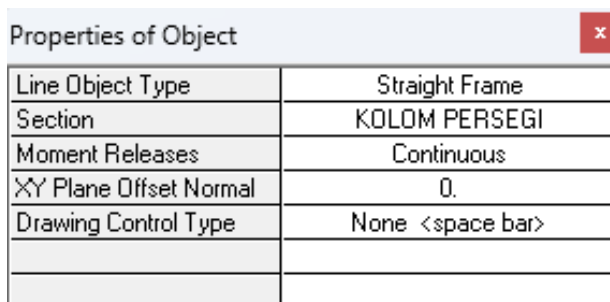
Setelah tahap pendefinisian penampang selesai, langkah selanjutnya adalah mengaplikasikan properti tersebut ke dalam model kerja. Pada tahap ini, elemen kolom tunggal digambarkan sebagai komponen *frame* vertikal yang menghubungkan titik koordinat dasar hingga titik puncak setinggi 1465 mm.

Pemodelan elemen kolom dilakukan dengan cara klik menu *Draw > Draw Frame/Cable/Tendon*. Kemudian akan muncul *Properties of Object*. Pada bagian *Section* pilih Kolom Bulat atau Kolom Persegi sesuai dengan apa yang didefinisikan sebelumnya lalu klik titik koordinat dasar hingga titik puncak dan klik *esc* pada papan ketik. Pemodelan dilakukan secara bergantian apabila menggunakan satu file yang sama, dengan memulai dari pemodelan kolom berpenampang bulat. Setelah proses analisis selesai dilakukan, tahapan yang sama kemudian diulangi untuk kolom berpenampang persegi.



Properties of Object	
Line Object Type	Straight Frame
Section	KOLOM BULAT
Moment Releases	Continuous
XY Plane Offset Normal	0.
Drawing Control Type	None <space bar>

Gambar 17. *Properties of Object* untuk Pemodelan Kolom Berpenampang Bulat

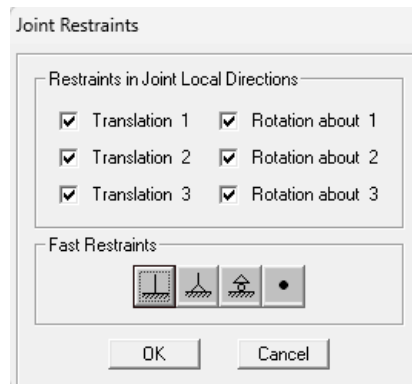


Properties of Object	
Line Object Type	Straight Frame
Section	KOLOM PERSEGI
Moment Releases	Continuous
XY Plane Offset Normal	0.
Drawing Control Type	None <space bar>

Gambar 18. *Properties of Object* untuk Pemodelan Kolom Berpenampang Persegi

2.8.5. Penentuan Kondisi Batas dan Tumpuan Jepit

Setelah seluruh geometri elemen kolom selesai dimodelkan, langkah selanjutnya adalah menentukan kondisi batas (*boundary conditions*) pada struktur. Pemberian tumpuan ini sangat krusial dalam analisis *pushover* untuk memastikan stabilitas model dan merepresentasikan kondisi perletakan di lapangan secara akurat. Proses pemberian tumpuan dilakukan dengan cara klik titik dasar pada kolom dan klik menu *Assign > Joint > Restraints*. Selanjutnya akan muncul jendela pengaturan *Joint Restraints* dan pilih tumpuan jepit lalu klik *Ok*. Dengan memilih tumpuan jepit, seluruh derajat kebebasan pada titik tersebut dikunci, yang meliputi translasi pada arah X, Y, Z serta rotasi pada arah X, Y, Z.

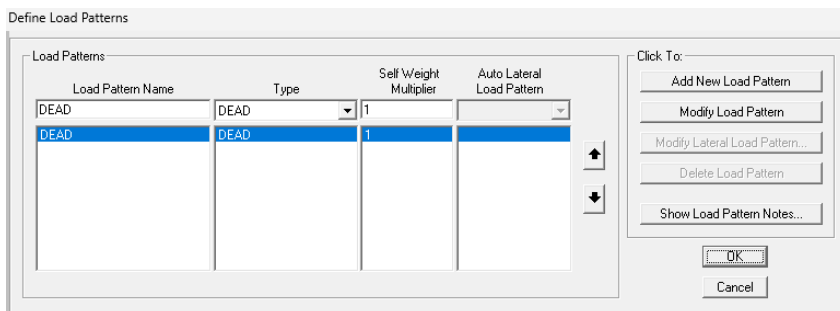


Gambar 19. Pengaturan *Joint Restraints* untuk Tumpuan Jepit

2.8.6. Definisi Pola Pembebanan (*Load Patterns*)

Tahap ini bertujuan untuk menentukan kategori beban yang bekerja pada elemen kolom tunggal selama simulasi berlangsung. Dalam analisis *pushover* ini, persentase pembebanan gravitasi yang diperhitungkan adalah 100% beban mati, sedangkan beban hidup tidak dimasukkan ke dalam parameter perhitungan. Hal tersebut dikarenakan objek penelitian merupakan kolom tunggal yang tidak menumpu pelat lantai sebagai area penyimpanan atau fungsional.

Pendefinisian *Load Patterns* dilakukan dengan cara klik *Define > Load Patterns* lalu *input* sesuai dengan gambar dibawah ini.



Gambar 20. Jendela Definisi Pola Pembebanan

2.8.7. Definisi Kasus Beban (*Load Case*)

Pendefinisian *load case* pada analisis statik nonlinier *pushover* dilakukan melalui dua tahapan pembebanan. Tahap pertama berupa analisis struktur dengan mempertimbangkan beban gravitasi yang terdiri dari beban mati tanpa melibatkan perilaku nonlinier struktur. Selanjutnya, pada tahap kedua dilakukan pemberian beban lateral secara bertahap pada struktur untuk mengevaluasi respons nonlinier, kapasitas deformasi, serta perilaku struktur hingga mendekati kondisi keruntuhan.

2.8.7.1. Pendefinisian Beban Gravitasi *Pushover*

Tahap ini merupakan pengaturan parameter pembebanan gravitasi yang dianalisis menggunakan prosedur nonlinier sebagai kondisi awal sebelum beban lateral diaplikasikan pada struktur. Beban gravitasi yang diperhitungkan mencakup 100% beban mati total. Penentuan kasus beban ini sebagai *Nonlinear Static* sangat penting agar perilaku material dan tegangan awal pada penampang kolom dapat terakumulasi secara akurat sebelum simulasi beban dorong (*push*) dimulai.

Pendefinisian beban gravitasi dilakukan dengan cara klik menu *Define > Load Cases > Add New Load Case* dan input parameternya. Untuk lebih lengkapnya, berikut adalah pendefinisian *load case* dari beban gravitasi.

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name GRAVITY Set Def Name	Notes <input <="" td="" type="button" value="Modify/Show..."/> <td>Load Case Type Static <input <="" td="" type="button" value="Design..."/> </td>	Load Case Type Static <input <="" td="" type="button" value="Design..."/>									
Initial Conditions ☒ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State ☐ Continue from State at End of Nonlinear Case v Important Note: Loads from this previous case are included in the current case		Analysis Type ☐ Linear ☒ Nonlinear ☐ Nonlinear Staged Construction									
Modal Load Case All Modal Loads Applied Use Modes from Case v MODAL		Geometric Nonlinearity Parameters ☐ None ☒ P-Delta ☐ P-Delta plus Large Displacements									
Loads Applied <table border="1"> <thead> <tr> <th>Load Type</th> <th>Load Name</th> <th>Scale Factor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Load Pattern</td> <td>DEAD</td> <td>1.</td> </tr> <tr> <td>Load Pattern</td> <td>DEAD</td> <td>1.</td> </tr> </tbody> </table> Add Modify Delete			Load Type	Load Name	Scale Factor	Load Pattern	DEAD	1.	Load Pattern	DEAD	1.
Load Type	Load Name	Scale Factor									
Load Pattern	DEAD	1.									
Load Pattern	DEAD	1.									
Other Parameters <table border="1"> <tr> <td>Load Application</td> <td>Full Load</td> <td><input <="" td="" type="button" value="Modify/Show..."/> </td></tr> <tr> <td>Results Saved</td> <td>Final State Only</td> <td><input <="" td="" type="button" value="Modify/Show..."/> </td></tr> <tr> <td>Nonlinear Parameters</td> <td>Default</td> <td><input <="" td="" type="button" value="Modify/Show..."/> </td></tr> </table> OK Cancel			Load Application	Full Load	<input <="" td="" type="button" value="Modify/Show..."/>	Results Saved	Final State Only	<input <="" td="" type="button" value="Modify/Show..."/>	Nonlinear Parameters	Default	<input <="" td="" type="button" value="Modify/Show..."/>
Load Application	Full Load	<input <="" td="" type="button" value="Modify/Show..."/>									
Results Saved	Final State Only	<input <="" td="" type="button" value="Modify/Show..."/>									
Nonlinear Parameters	Default	<input <="" td="" type="button" value="Modify/Show..."/>									

Gambar 21. *Load Case Gravity*

Load Application Control for Nonlinear Static Analysis

Load Application Control

☒ Full Load

☐ Displacement Control

Control Displacement

☐ Use Conjugate Displacement

☒ Use Monitored Displacement

Load to a Monitored Displacement Magnitude of

Monitored Displacement

☒ DOF at Joint

☐ Generalized Displacement

OK Cancel

Gambar 22. Load Application Gravity

Results Saved for Nonlinear Static Load Cases

Results Saved

☒ Final State Only ☐ Multiple States

For Each Stage

Minimum Number of Saved States

Maximum Number of Saved States

☒ Save positive Displacement Increments Only

OK Cancel

Gambar 23. Results Saved Gravity

2.8.7.2. Pendefinisian Beban Lateral *Pushover*

Kasus beban lateral didefinisikan untuk mensimulasikan gaya dorong statik nonlinier pada elemen kolom tunggal, yang dalam penelitian ini terdiri dari analisis Pushover X dan Pushover Y. Prosedur pembuatan kasus beban ini memiliki kemiripan dengan definisi beban gravitasi, namun terdapat perbedaan mendasar pada pengaturan parameter *Initial Condition*, *Loads Applied*, dan *Load Application*. Pada jendela *Load Case Data*, nama kasus beban ditetapkan sebagai Pushover X atau Pushover Y, dengan *Initial Condition* yang diatur menggunakan opsi *Continue from State at End of Nonlinear Case* yang merujuk pada beban Gravitasi yang telah didefinisikan sebelumnya. Pada bagian *Load Applied*, *Load Type* pilih *Accel*,

kemudian dipilih arah Ux untuk analisis arah X atau Uy untuk arah Y dengan nilai *Scale Factor* sebesar -1, sementara pada bagian *Load Application* digunakan metode *Displacement Control* untuk memantau perilaku keruntuhan kolom tunggal hingga mencapai target deformasi yang direncanakan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut.

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: Pushover X [Set Def Name] [Modify/Show...]

Notes: [Modify/Show...]

Load Case Type: Static [Design...]

Initial Conditions:

- ☐ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- ☒ Continue from State at End of Nonlinear Case [Gravity X]

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case: All Modal Loads Applied Use Modes from Case [MODAL]

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale Factor
Accel	UX	-1
Accel	UX	-1

[Add] [Modify] [Delete]

Analysis Type:

- ☐ Linear
- ☒ Nonlinear
- ☐ Nonlinear Staged Construction

Geometric Nonlinearity Parameters:

- ☐ None
- ☒ P-Delta
- ☐ P-Delta plus Large Displacements

Other Parameters:

Load Application: [Full Load] [Modify/Show...]

Results Saved: [Final State Only] [Modify/Show...]

Nonlinear Parameters: [Default] [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

Gambar 24. Load Case Pushover X

Load Application Control for Nonlinear Static Analysis

Load Application Control:

- ☐ Full Load
- ☒ Displacement Control

Control Displacement:

- ☐ Use Conjugate Displacement
- ☒ Use Monitored Displacement

Load to a Monitored Displacement Magnitude of [58.6]

Monitored Displacement:

- ☒ DOF [U1] at Joint [2]
- ☐ Generalized Displacement []

[OK] [Cancel]

Gambar 25. Load Application Pushover X

Results Saved for Nonlinear Static Load Cases

Results Saved

☐ Final State Only ☒ Multiple States

For Each Stage

Minimum Number of Saved States 10

Maximum Number of Saved States 100

☒ Save positive Displacement Increments Only

OK Cancel

Gambar 26. Results Saved Pushover X

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: Pushover Y Set Def Name Notes: Modify/Show...

Load Case Type: Static Design...

Initial Conditions

☐ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

☒ Continue from State at End of Nonlinear Case Gravity X

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case

All Modal Loads Applied Use Modes from Case: MODAL

Loads Applied

Load Type	Load Name	Scale Factor
Accel	UY	-1.
Accel	UY	-1.

Add Modify Delete

Geometric Nonlinearity Parameters

☐ None

☒ P-Delta

☐ P-Delta plus Large Displacements

Other Parameters

Load Application: Displ Control Modify/Show...

Results Saved: Multiple States Modify/Show...

Nonlinear Parameters: Default Modify/Show...

OK Cancel

Gambar 27. Load Case Pushover Y

Load Application Control for Nonlinear Static Analysis

Load Application Control

☐ Full Load

☒ Displacement Control

Control Displacement

☐ Use Conjugate Displacement

☒ Use Monitored Displacement

Load to a Monitored Displacement Magnitude of

Monitored Displacement

☒ DOF at Joint

☐ Generalized Displacement

Gambar 28. *Load Application Pushover Y*

Results Saved for Nonlinear Static Load Cases

Results Saved

☐ Final State Only ☒ Multiple States

For Each Stage

Minimum Number of Saved States

Maximum Number of Saved States

☒ Save positive Displacement Increments Only

Gambar 29. *Results Saved Pushover Y*

Pada penelitian ini, beban dorong lateral tidak dimaksudkan untuk merepresentasikan bangunan dengan jumlah lantai tertentu, seperti rumah 2 lantai atau 3 lantai, karena objek yang dianalisis berupa kolom tunggal. Oleh sebab itu, fokus penelitian diarahkan pada evaluasi perilaku nonlinier kolom terhadap pembebanan lateral bertahap. Karena model yang digunakan bukan merupakan model struktur gedung secara keseluruhan, maka analisis pushover dilakukan dengan memberikan percepatan lateral (Accel) pada arah UX dan UY untuk menghasilkan gaya inersia lateral pada elemen kolom. Pendekatan ini bertujuan untuk mengevaluasi kapasitas deformasi, proses terbentuknya sendi plastis, serta pola keruntuhan kolom secara individual, bukan untuk meninjau respons global suatu bangunan tertentu.

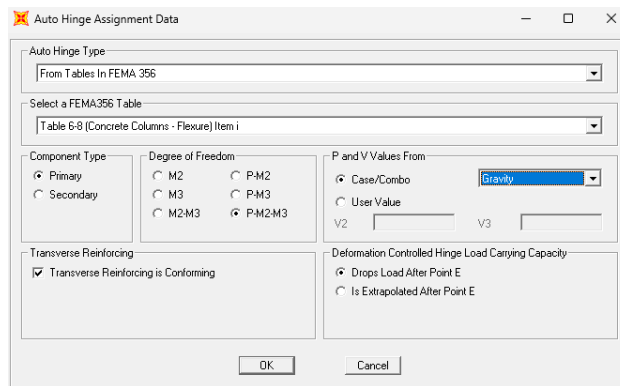
Pendefinisian kasus beban lateral dilakukan setelah struktur mencapai kondisi tegangan awal akibat pembebanan gravitasi sebesar 100% beban mati (*load case gravity*). Pada penelitian ini, beban dorong dimodelkan menggunakan *Load Type Accel*, dengan arah UX untuk analisis *pushover* X dan arah UY untuk analisis *pushover* Y serta *scale factor* sebesar satu. Penggunaan beban akselerasi bertujuan untuk merepresentasikan gaya inersia akibat gempa yang bekerja pada struktur. Berdasarkan prinsip dinamika struktur, gaya inersia tersebut terbentuk dari interaksi antara massa dan percepatan, sehingga SAP2000 secara otomatis menghasilkan distribusi gaya lateral berdasarkan massa struktur yang berasal dari berat sendiri dan beban mati yang telah diperhitungkan pada tahap pembebanan gravitasi.

Selanjutnya, beban lateral diberikan secara bertahap dan terus meningkat (*monotonically increasing*) menggunakan metode *Displacement Control*. Metode ini digunakan untuk mengendalikan analisis berdasarkan target perpindahan pada titik pantau (*control node*), yaitu *Joint* dua (puncak atas kolom), hingga mencapai perpindahan sebesar 58.6 mm. Melalui pendekatan tersebut, respons nonlinier kolom dapat diamati secara menyeluruh, mulai dari kondisi elastis, pembentukan sendi plastis, hingga mendekati kondisi keruntuhan. Selain itu, penggunaan *Displacement Control* memungkinkan kurva kapasitas struktur diperoleh secara lebih lengkap sehingga kapasitas deformasi, perilaku setelah leleh, dan tingkat degradasi kekuatan kolom dapat dievaluasi dengan lebih akurat.

2.8.8. Pendefinisian Sendi Plastis (*Plastic Hinge*)

Tahap penting sebelum melakukan analisis *pushover* adalah mendefinisikan sendi plastis (*plastic hinge*) pada setiap elemen struktur. Penentuan sendi plastis ini dimodelkan berdasarkan perilaku nonlinier struktur yang akan sangat memengaruhi hasil evaluasi kinerja pada desain yang direncanakan. Pada elemen kolom tunggal, penempatan sendi plastis ini berfungsi untuk mempresentasikan area yang mengalami kerusakan atau pelelehan material saat struktur menerima beban lateral pascapuncak. Akurasi dalam pendefinisian parameter sendi plastis akan menentukan ketepatan kurva kapasitas serta mekanisme keruntuhan yang terjadi pada kolom.

Pendefinisian sendi plastis dapat dilakukan dengan cara klik menu *Select > Properties > Frame Sections* lalu pilih penampang kolom yang telah didefinisikan sebelumnya. Selanjutnya, klik menu *Assign > Frame > Hinges* dan akan muncul jendela *Frame Hinge Assignments*. Pada bagian *Relative Distance* input 0.05 dan 0.95 secara bergantian lalu klik *Add* hingga muncul *Auto Hinge Assignment Data* seperti pada gambar dibawah ini.

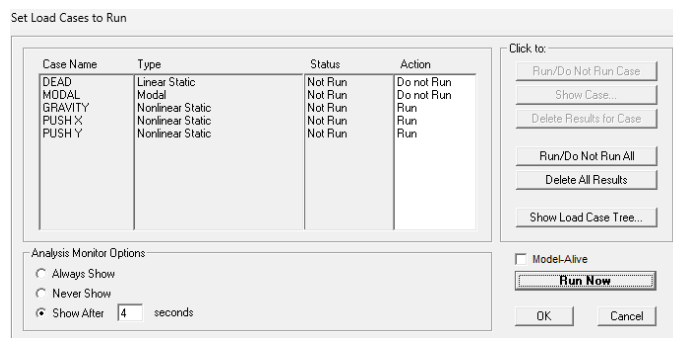


Gambar 30. Setting Hinge Kolom

2.8.9. Pelaksanaan Analisis *Pushover* (*Running Analysis*)

Setelah seluruh parameter *load pattern*, *load case pushover*, serta definisi sendi plastis selesai diinput ke dalam pemodelan struktur pada program SAP2000, tahap berikutnya adalah menjalankan proses analisis (*running analysis*). Proses komputasi *pushover* ini dilakukan secara otomatis oleh program SAP2000 untuk mengevaluasi perilaku nonlinier struktur hingga mencapai kondisi batas yang ditentukan. Durasi yang dibutuhkan untuk menyelesaikan analisis ini sangat bergantung pada kompleksitas model dan parameter nonlinier yang ditetapkan.

Running dilakukan dengan cara klik menu *Analyze > Run Analysis*. Modal dan *Linear Static* tidak dijalankan agar waktu yang dibutuhkan untuk *running* tidak terlalu lama.



Gambar 31. Set Load Cases to Run

2.9. Metode Analisis Data

Analisis data dilakukan secara komparasi (perbandingan) dan deskriptif analitis berdasarkan hasil keluaran (*output*) dari analisis *pushover* SAP2000.

2.9.1. Analisis Perbandingan Kurva Kapasitas

Tahapan ini dilakukan dengan mengevaluasi kurva kapasitas, yaitu hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan puncak pada kolom. Hasil evaluasi kurva ini menunjukkan nilai kekuatan lateral struktur, kekakuan yang terlihat melalui kemiringan kurva sebelum mencapai titik leleh, serta daktilitas yang merepresentasikan kemampuan kolom dalam menahan deformasi setelah melewati kondisi leleh.

2.9.2. Penentuan Titik Kinerja (*Performance Point*)

Penentuan titik kinerja dilakukan dengan metode koefisien perpindahan (FEMA 356). Metode ini menghitung target perpindahan lateral dengan menggunakan persamaan koefisien perpindahan, yang memperhitungkan faktor-faktor seperti koefisien modifikasi perpindahan (C_0 , C_1 , C_2 , C_3) dan percepatan spektral. Persamaan yang digunakan adalah Persamaan (1).

2.9.3. Evaluasi Tingkat Kinerja (*Performance Level*)

Tingkat kinerja struktural ditentukan dengan membandingkan respons maksimum kolom pada Titik Kinerja terhadap batas deformasi, seperti rasio *drift* atau batasan deformasi sendi plastis, sesuai dengan ketentuan dalam pedoman standar. Berdasarkan FEMA 356, evaluasi dilakukan dengan mempertimbangkan rasio *drift* aktual maupun kondisi sendi plastis, yang membagi tingkat kinerja struktur ke dalam kategori *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS), dan *Collapse Prevention* (CP).

2.9.4. Analisis Pola Sendi Plastis (*Plastic Hinge*)

Analisis dilakukan untuk mengamati pola dan tahapan terbentuknya sendi plastis pada kolom beton bertulang dengan penampang bulat dan persegi. Pengamatan ini dilakukan pada setiap tahapan beban dorong (*Pushover Step*) hingga struktur mencapai Titik Kinerja, dengan tujuan untuk mengidentifikasi lokasi kritis tempat sendi plastis mulai terbentuk, serta urutan dan tingkat kerusakan yang terjadi, seperti transisi dari tahap $A \rightarrow B \rightarrow IO \rightarrow LS \rightarrow CP \rightarrow C \rightarrow D$ dan lain sebagainya.