

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang memiliki risiko seismik tinggi karena terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama yaitu lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia, dan lempeng Pasifik yang mengakibatkan aktivitas seismik yang intensif (Tampubolon et al., 2022). Kondisi geologis ini menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara dengan tingkat kegempaan tertinggi di dunia, sehingga berpotensi mengalami kerusakan struktur bangunan yang signifikan akibat beban seismik. Oleh karena itu, perencanaan bangunan tahan gempa menjadi aspek penting dalam rekayasa struktur guna meminimalkan risiko keruntuhan serta korban jiwa (Laresi et al., 2019).

Dalam perancangan gedung, terdapat beberapa aspek yang perlu diperhatikan, salah satunya adalah ketidakberaturan dalam arah horizontal dan vertikal. Salah satu bentuk ketidakberaturan vertikal adalah ketidakberaturan tingkat lunak, yang dikenal sebagai *soft story*. Ketidakberaturan vertikal tingkat lunak, *soft story*, dapat terjadi pada bangunan yang memiliki salah satu lantai dengan perbedaan ketinggian signifikan dibandingkan lantai lainnya. Kondisi ini dapat ditemukan pada lantai dasar bangunan maupun lantai lainnya. *Soft story* didefinisikan sebagai lantai yang memiliki kekakuan atau daktilitas yang tidak memadai dalam menahan beban seismik. Dampak dari *soft story* pada suatu bangunan menjadi signifikan apabila bangunan tersebut menerima beban lateral yang besar, seperti beban gempa. Fenomena *soft story* bila terjadi pada lantai dasar bangunan, yang berarti bahwa apabila kolom pada lantai dasar mengalami kegagalan, maka bangunan dapat mengalami keruntuhan total dan tidak dapat digunakan kembali (Tjong & Singh, 2025).

Dalam perencanaan tersebut, karakteristik elemen struktur, khususnya kolom, memiliki peranan penting dalam menentukan respons bangunan terhadap beban lateral. Bentuk penampang kolom seperti kolom bulat dan kolom persegi memiliki perbedaan dalam distribusi kekakuan, kekuatan, serta daktilitas, yang pada akhirnya memengaruhi perilaku struktur saat mengalami gempa. Oleh karena itu, pemilihan bentuk penampang kolom menjadi salah satu faktor yang perlu dipertimbangkan dalam desain struktur tahan gempa.

Kecenderungan terbaru perencanaan bangunan tahan gempa saat ini adalah menggunakan metode perencanaan berbasis kinerja (*Performance Based Design / PBD*). Salah satu metode yang umum digunakan adalah analisis statik nonlinier (*pushover analysis*), yang mampu menggambarkan perilaku struktur hingga kondisi pasca-elastik dan menentukan tingkat kinerja struktur berdasarkan parameter seperti *base shear*, *displacement*, dan *drift*. Perencanaan tahan gempa berbasis kinerja (*Performance - Based Seismic Design*) sebagai pengembangan dari konsep PBD merupakan proses yang dapat digunakan untuk perencanaan bangunan baru maupun bangunan yang sudah ada, dengan pemahaman yang realistis terhadap risiko keselamatan (*life*), kesiapan pakai (*occupancy*) dan kerugian harta benda (*economic loss*) yang mungkin terjadi akibat gempa yang akan datang. Menurut (Firdha et al., 2021), perancangan gedung yang aman agar tidak mengakibatkan adanya korban jiwa menjadi suatu keharusan dalam perancangan sebuah gedung terutama pada gedung bertingkat.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengevaluasi kinerja struktur menggunakan analisis pushover, namun sebagian besar masih berfokus pada variasi sistem struktur atau konfigurasi bangunan, bukan pada perbandingan bentuk

penampang kolom. Penelitian yang secara khusus membandingkan kinerja bangunan dengan kolom bulat dan kolom persegi dalam satu model struktur yang sama masih relatif terbatas, sehingga diperlukan kajian lebih lanjut untuk memahami pengaruh bentuk penampang kolom terhadap respons seismik bangunan. Sebagai contoh, Wulandari dan Wardi (2023) melakukan evaluasi kinerja seismik bangunan menggunakan metode pushover pada bangunan tiga lantai di Kota Padang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode pushover mampu menentukan *performance point* serta pola keruntuhan struktur secara jelas, sehingga dapat digunakan sebagai dasar evaluasi kinerja struktur terhadap gempa. Faradhilla dan Mentari, (2024) juga melakukan penelitian pada gedung eksisting di Jakarta menggunakan pushover statik nonlinier, hasilnya menunjukkan bahwa metode ini relevan untuk mengevaluasi kinerja seismik gedung di wilayah rawan gempa, sebagai upaya memastikan keselamatan struktur terhadap beban gempa. Selanjutnya, Nuranita et al., (2022) meneliti pengaruh variasi penampang kolom pada struktur gedung dengan metode pushover. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan bentuk penampang kolom memengaruhi tingkat kinerja struktur, kapasitas *base shear*, serta pola distribusi sendi plastis. Terakhir, Khairunnisa et al., (2024) melakukan penelitian terkait perbandingan kolom dengan sengkang persegi dan spiral pada bangunan sepuluh lantai. Hasilnya menunjukkan bahwa kolom dengan tulangan spiral memiliki kinerja seismik yang lebih baik, ditunjukkan dengan nilai *displacement* dan *drift* yang lebih kecil, serta peningkatan daktilitas struktur

Meskipun demikian, ada sejumlah celah riset (*research gap*) dari literatur terdahulu yang membuat penelitian ini menjadi penting. Sebagian besar studi *pushover* fokus pada bangunan tingkat rendah, menengah atau tinggi dengan dimensi kolom berbentuk persegi, sedangkan bangunan tingkat rendah, menengah atau tinggi dengan dimensi kolom berbentuk silinder, relatif sedikit diteliti secara mendetail. Banyak studi menggunakan analisa *pushover*, tetapi kurang menyoroti evaluasi secara spesifik pada kolom dengan dimensi silinder, terutama dengan detail penulangan untuk tulangan geser, konfigurasi penampang, dan perilaku saat beban lateral. Oleh karena itu, penelitian ini berupaya mengisi kekosongan tersebut dengan fokus pada perbandingan evaluasi kolom berbentuk silinder dan persegi yang menggunakan tulangan spiral pada bangunan tingkat rendah menggunakan pushover statik non-linier sehingga hasilnya dapat menunjukkan efektivitas sebagai upaya memastikan keselamatan struktur terhadap beban gempa.

Metode *pushover* biasanya digunakan untuk mengidentifikasi pola keruntuhan yang mungkin terjadi pada struktur dan untuk menentukan kapasitas struktur sebelum terjadi kerusakan yang signifikan. (Sitohang, 2023) menyebutkan bahwa analisis *pushover* adalah analisis statik non-linier dimana pengaruh gempa rencana terhadap struktur bangunan gedung dianggap sebagai beban-beban statik yang diterima pada pusat massa tiap lantai. Kemudian bebannya ditingkatkan secara bertahap sampai satu target perpindahan lateral dari suatu titik acuan tercapai. Tujuan analisis *pushover* adalah untuk memperkirakan gaya maksimum dan deformasi yang terjadi serta memperoleh informasi bagian mana saja yang kritis. Selanjutnya dapat diidentifikasi bagian-bagian yang memerlukan perhatian khusus untuk pendetailan atau stabilitasnya. Proses *pushover* akan menghasilkan kurva kapasitas yang akan menggambarkan kondisi linear sebelum mencapai titik leleh (Hasibuan et al., 2023).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang , maka rumusan masalah dari penelitian ini antara lain :

1. Bagaimana perbandingan perilaku nonlinier struktur bangunan tingkat rendah yang menggunakan kolom berbentuk bulat (silinder) dan kolom berbentuk persegi berdasarkan kurva kapasitas hasil analisis pushover statik nonlinier?
2. Bagaimana perbedaan kapasitas struktur dalam menahan beban lateral (*base shear*) antara bangunan dengan kolom bulat dan kolom persegi?
3. Bagaimana perbandingan tingkat kinerja seismik (*performance level*) antara bangunan berkolom bulat dan berkolom persegi berdasarkan metode ATC-40

1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik struktur, khususnya terkait analisis kinerja seismik bangunan beton bertulang menggunakan metode pushover statik nonlinier. Selain itu, penelitian ini dapat memperkaya kajian mengenai perbandingan perilaku dan kinerja struktur antara kolom berpenampang bulat dan kolom berpenampang persegi, yang masih relatif terbatas dalam literatur. Berdasarkan rumusan masalah, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis dan membandingkan perilaku nonlinier struktur bangunan tingkat rendah yang menggunakan kolom bulat dan kolom persegi melalui kurva kapasitas hasil analisis pushover.
2. Mengevaluasi perbedaan kapasitas struktur dalam menahan beban gempa, khususnya terhadap kapasitas lateral maksimum pada kedua tipe kolom.
3. Menentukan dan membandingkan tingkat kinerja seismik (*performance level*) bangunan dengan kolom bulat dan kolom persegi berdasarkan metode ATC-40.

1.4 Batasan Masalah

Batasan dari penelitian ini adalah :

1. Menganalisis struktur gedung setelah menerima beban gempa menggunakan SAP2000v24 berdasarkan peraturan pembebanan gempa SNI 1726 : 2019 dan standar ATC-40.
2. Pembebanan gedung meliputi :
 - a. Beban mati (berupa berat sendiri struktur)
 - b. Beban mati tambahan (berupa berat selain berat sendiri struktur)
 - c. Beban hidup (sesuai dengan SNI 1727:2020)
 - d. Beban lateral (berupa beban gempa)
 - e. Dalam analisis ini beban angin tidak diperhitungkan
 - f. Struktur gedung mengikuti aturan perencanaan SNI 2874:2019
3. Peta sumber gempa dan bahaya gempa yang digunakan adalah peta sumber tahun 2017.
4. Bangunan diasumsikan empat lantai untuk bangunan perkantoran di Kota Palu.
5. Dimensi elemen-elemen struktur sama untuk setiap bangunan yang ditinjau, yaitu untuk balok digunakan dimensi 200 x 350 mm dengan ketebalan pelat lantai dan pelat atap masing-masing 120 mm dan 100 mm.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang penulis dapatkan dalam penelitian ini adalah :

1. Memahami perilaku serta kinerja struktur bangunan tingkat rendah yang memiliki penampang kolom bulat dan persegi setelah menerima beban gempa
2. Menambah pemahaman penulis tentang program SAP2000.

1.6 Teori

1.6.1 Gempa Bumi

Gempa merupakan salah satu penyebab terjadinya perubahan pembebanan pada struktur yang tidak dapat diramalkan kapan terjadinya. Dengan adanya pengaruh gaya lateral dari gempa yang terjadi dapat mengakibatkan penurunan kinerja pada struktur gedung. Gempa bumi terjadi karena pelepasan energi akibat dari tekanan lempeng yang mengalami pergerakan (Tampubolon,2022). Gempa bumi adalah bergetarnya permukaan tanah karena pelepasan energi secara tiba-tiba akibat dari pecahnya/slipnya massa batuan di lapisan kerak bumi. Gempa bumi yang terjadi di Indonesia banyak yang menimbulkan kerusakan struktur bangunan gedung di Indonesia. Dengan merencanakan suatu struktur dengan beban gempa, banyak aspek yang mempengaruhinya diantaranya adalah periode bangunan. Periode bangunan itu sangat dipengaruhi oleh massa struktur serta kekakuan struktur tersebut. Kekakuan struktur sendiri dipengaruhi oleh kondisi struktur, bahan yang digunakan serta dimensi struktur yang digunakan. Evaluasi untuk memperkirakan kondisi struktur bangunan pada saat gempa perlu untuk mendapatkan jaminan bahwa kinerjanya memuaskan pada saat terjadinya gempa. Gempa bumi biasanya terjadi pada perbatasan lempeng yang sangat beresiko terjadi pada perbatasan lempengan kompresional serta translasional. Secara umum gempa bumi dibagi menjadi tiga jenis yaitu :

1. Tektonisme

Getaran yang diakibatkan oleh tektonisme berasal dari dalam bumi yang mengakibatkan patahan pada kulit bumi. Tenaga tektonik dibedakan menjadi 2 macam yaitu gerak oroganesa dan gerak epiroganesa. Gerak oroganesa adalah getaran endogen yang relatif cepat dan meliputi daerah yang cukup sempit, getaran ini menyebabkan terbentuknya pegunungan. Sedangkan getaran epiroganesa dibagi menjadi 2 bagian yaitu getaran epiroganesa positif dan getaran negative. Getaran epiroganesa positif terjadi ketika permukaan bumi turun sehingga seolah-olah laut terlihat naik dan getaran epiroganesa negatif terjadi ketika permukaan bumi bergerak naik sehingga seolah-olah laut terlihat turun.

2. Vulkanisme

Vulkanisme merupakan gejala alam yang terjadi akibat adanya aktivitas magma. Vulkanisme terjadi akibat adanya tektonisme yang mengakibatkan aliran lava dalam litosfer ke lapisan atasnya.

3. Seisme

Salah satu penyebab terjadinya gempa bumi karena adanya pelepasan energi dari dalam secara tiba-tiba yang menciptakan gelombang seismik. Energi

yang dihasilkan menyebar ke segala arah sehingga efeknya sampai kepermukaan bumi. Maka dapat disimpulkan bahwa penyebab utama terjadinya gempa bumi berawal dari adanya gaya pergerakan didalam interior bumi (gaya konveksi material) yang menekan kerak bumi (*outer layer*) yang bersifat rapuh, sehingga ketika kerak bumi tidak lagi kuat dalam merespon gaya gerak dari dalam bumi tersebut maka akan membuat sesar dan menghasilkan gempa bumi. Akibat gaya gerak dari dalam bumi ini maka kerak bumi telah terbagi-bagi menjadi beberapa fragmen yang disebut lempeng (*plate*).

1.6.2 Konsep Bangunan Tahan Gempa

Perencanaan struktur tahan gempa merupakan suatu proses yang tidak sederhana dibutuhkan pemahaman dan konsistensi mengenai konsep desain menyeluruh. Konsep perencanaan konstruksi didasarkan pada analisa kekuatan batas (*ultimate strength*) yang mempunyai daktilitas cukup untuk menyerap energi gempa sesuai peraturan yang berlaku.

1.6.2.1 Daktilitas

Daktilitas adalah kemampuan sebuah struktur atau komponen untuk menahan respon inelastik, termasuk lendutan terbesar dan menyerap energi. Parameter yang digunakan untuk menentukan daktilitas suatu bahan/struktur disebut Faktor Daktilitas (μ). Menurut Paulay dan Priestly (1992), dalam Sitohang (2023), pada dasarnya daktilitas dibagi atas beberapa jenis yaitu :

a. Daktilitas Regangan (*Strain Ductility*)

Daktilitas regangan mengacu pada kemampuan struktur untuk mencapai kondisi inelastik pada panjang tertentu dari salah satu bagiannya. Apabila tegangan inelastik terkonsentrasi pada panjang yang sangat pendek, maka akan menghasilkan peningkatan substansial pada daktilitas regangan.

b. Daktilitas Kelengkungan

Daktilitas kelengkungan didefinisikan sebagai perbandingan antara sudut kelengkungan (rotasi sudut per unit panjang) maksimum yang dialami oleh elemen struktur akibat momen lentur, terhadap sudut kelengkungan saat leleh (*yield curvature*).

c. Daktilitas Perpindahan

Daktilitas perpindahan adalah rasio antara perpindahan struktur maksimum (δ_u) dengan perpindahan struktur pada saat leleh (δ_y). Tingkat kinerja struktur berkaitan erat dengan target perpindahan yang diharapkan pada tahap perancangan awal (pra-desain) (ATC, 1996; 2000; 2004). Dalam konteks ini, perpindahan atap pada kondisi target perpindahan (δ_t) diasumsikan sebagai perpindahan ultimit (δ_u) dalam perhitungan parameter daktilitas perpindahan.

d. Daktilitas Rotasi

Daktilitas rotasi merupakan perbandingan antara putaran sudut maksimum dengan putaran sudut saat leleh (*yield rotation*). Jenis daktilitas ini menjadi basis utama dalam perencanaan struktur tahan gempa. Secara spesifik,

sambungan antara balok dan kolom dirancang sebagai elemen yang mengalami leleh (kondisi plastis) untuk mengabsorpsi beban seismik. Semakin tinggi tingkat daktilitas suatu struktur, maka akan semakin tinggi pula kuat ultimit dan semakin besar kemampuan deformasinya sebelum kegagalan terjadi.

1.6.2.2 Stabilitas

Stabilitas suatu gedung ditentukan untuk memastikan bahwa tingkat keamanan struktur tidak melampaui batas yang telah ditetapkan. Dalam menganalisis stabilitas gedung terhadap momen torsi yang bertujuan meminimalkan potensi terjadinya puntir, faktor utama yang berpengaruh adalah eksentrisitas antara pusat massa dan pusat kekuatan struktur. Apabila terjadi momen tak terduga, momen torsi yang telah dihitung sebelumnya harus ditambahkan sebesar 5% dari dimensi struktur. Mengacu pada SNI 1726:2019, ketentuan terkait stabilitas gedung terhadap beban gempa mencakup hal-hal berikut:

a. *Drift ratio*

Menurut Pasal 8.8.5 SNI 1726:2019, simpangan antar tingkat diperlukan untuk berbagai tujuan, antara lain sebagai acuan dalam tata cara material, penentuan jarak pemisahan antarsistem struktur, desain elemen penutup bangunan (cladding), serta kebutuhan desain lainnya. Nilai simpangan antar tingkat ditetapkan sebesar 1% dari tinggi tingkat bangunan. Seluruh elemen struktur wajib dirancang untuk menahan gaya seismik, kecuali bila elemen tersebut dipisahkan oleh jarak yang memadai sehingga tidak terjadi kontak yang merusak akibat defleksi total bangunan.

b. Simpangan Antar Lantai (*Drift inter-storey*)

Pengendalian simpangan antar lantai diatur dalam ketentuan yang berlaku pada standar tersebut. Parameter respons yang dianalisis harus dikombinasikan menggunakan metode akar jumlah kuadrat (*Square Root of the Sum of Squares/SRSS*) atau metode kombinasi kuadrat lengkap (*Complete Quadratic Combination/CQC*), yang perhitungannya mengikuti persamaan yang telah ditetapkan yaitu sebagai berikut:

$$\delta_y = \frac{C_d \delta_{xe}}{I_e} \quad (1)$$

Dimana :

C_d = faktor pembesaran defleksi

δ_y = defleksi pada lokasi lantai yang ditinjau diakibatkan gaya gempa lateral

I_e = faktor keutamaan gempa

Skala simpangan antar lantai, jika respons terkombinasi untuk geser ragam (V_t) < 85% dari $C_s W$, maka simpangan antar lantai harus dikali dengan $0,85 \frac{C_s W}{V_t}$

c. Rotasi Akibat P-Delta

Efek P-Delta merupakan salah satu bentuk efek orde kedua pada struktur, yang sering disebut sebagai *geometric nonlinearity effect*. Fenomena ini berkaitan dengan jumlah lantai dan ketinggian bangunan, di mana semakin

besar tinggi struktur, semakin signifikan pula pengaruh yang ditimbulkan oleh P-Delta. Efek ini muncul sebagai respons nonlinier pada elemen struktur yang mengalami gaya aksial. Dampak P-Delta terhadap gaya geser, momen, dan simpangan antar lantai pada bangunan bertingkat harus diperhitungkan apabila nilai koefisien stabilitas (θ) melebihi 0,1.

$$\theta = \frac{P_x \Delta I_e}{V_x h_{sx} C_d} \quad (2)$$

Dimana :

θ = koefisien stabilitas

P_x = beban desain vertikal total pada dan diatas tingkat x

Δ = simpangan antar lantai tingkat desain terjadi secara serentak dengan

I_e = faktor keutamaan hunian

V_x = gaya geser seismik yang bekerja antara tingkat x dan x-1

h_{sx} = tinggi tingkat di bawah tingkat x

C_d = faktor pembesaran defleksi

Namun nilai koefisien stabilitas tidak boleh melebihi θ yang ditentukan pada persamaan :

$$\theta_{max} = \frac{0,5}{\beta C_d} \leq 0,25 \quad (3)$$

Dimana :

θ_{max} = koefisien stabilitas maksimum

β = rasio kebutuhan geser terhadap kapasitas geser untuk tingkat antara tingkat x dan x-1

C_d = faktor pembesaran defleksi

1.6.2.3 Integritas

Menurut SNI 2847:2019, pendetailan tulangan dan sambungan harus dilakukan sedemikian rupa sehingga setiap komponen struktur terikat secara efektif untuk menjamin integritas keseluruhan sistem struktur. Adapun persyaratan minimum untuk konstruksi beton bertulang yang dicor di tempat meliputi:

- a. Balok yang berada di sepanjang perimeter diwajibkan memiliki tulangan menerus yang melampaui panjang bentangnya dan berada dalam zona yang dibatasi oleh tulangan longitudinal kolom, dengan ketentuan sebagai berikut:
 1. Sedikitnya 1/6 dari tulangan tarik yang diperlukan untuk menahan momen negatif di tumpuan, namun tidak boleh kurang dari dua batang tulangan.

2. Sedikitnya $\frac{1}{4}$ dari tulangan tarik yang dibutuhkan untuk momen positif di tengah bentang, dengan jumlah minimum dua batang tulangan.
- b. Tulangan transversal harus diangkur sesuai ketentuan detailing tulangan torsi. Tulangan ini tidak wajib diteruskan melewati kolom.
- c. Ujung tulangan yang memerlukan sambungan harus disambung pada area yang berada di sekitar tengah bentang, sedangkan tulangan yang terletak di bagian bawah harus disambung dekat tumpuan.
- d. Tulangan transversal yang setara dengan sedikitnya $\frac{1}{4}$ dari kebutuhan tulangan untuk momen positif di tengah bentang, dan tidak kurang dari dua batang tulangan, harus ditempatkan dalam zona yang dibatasi oleh tulangan longitudinal kolom dan harus bersifat menerus.
- e. Untuk pelat dua arah tanpa prategang, seluruh batang atau kawat tulangan bawah pada lajur kolom di setiap arah harus menerus. Sedikitnya dua batang tulangan atau kawat bawah pada lajur kolom per arah wajib melintas melalui zona yang dibatasi oleh tulangan memanjang kolom dan harus diberi angkur pada tumpuan luar.

1.6.2.4 Kolom Kuat - Balok Lemah (Strong Column-Weak Beam)

Perencanaan struktur bangunan terhadap beban gempa umumnya menerapkan konsep desain kapasitas, yaitu pendekatan yang mengendalikan pola keruntuhan melalui pemanfaatan kemampuan daktail struktur secara optimal. Konsep ini juga dikenal sebagai *strength-based design*, yang menekankan bahwa setiap elemen struktur harus memiliki kapasitas yang memadai untuk menahan gaya geser dasar akibat gempa yang diperhitungkan dalam proses perencanaan. Menurut Wardhono (2010) dalam Sitohang (2023), prinsip *strong column-weak beam* merupakan salah satu penerapan utama desain kapasitas. Pada prinsip ini, sendi plastis diizinkan terbentuk hanya pada ujung-ujung balok dan di dasar kolom saat struktur menerima pengaruh gempa rencana. Dengan demikian, keruntuhan dapat diarahkan terjadi pada elemen yang lebih mudah dikendalikan. Konsep desain kapasitas menetapkan dua batasan utama kinerja struktur, yaitu:

- a. Batas layan (*Serviceability Limit State*)
Fokus batasan ini adalah pengendalian dan pembatasan perpindahan (*displacement*) yang terjadi selama gempa. Setiap komponen struktur harus memiliki kekuatan cadangan sehingga tetap berperilaku elastis dan mampu menahan beban gempa tanpa mengalami kerusakan berat.
- b. Batas Tahan (*Survival Limit State*)
Pada kondisi perpindahan lateral yang besar, struktur harus tetap mempertahankan kekuatannya dalam menahan gaya lateral serta tetap mampu memikul beban gravitasi. Dalam mekanisme *strong column-weak beam*, distribusi kerusakan akibat beban gempa bergantung pada distribusi *story drift* sepanjang ketinggian bangunan. Jika kolom memiliki kapasitas lebih rendah, simpangan antar lantai cenderung terkonsentrasi pada satu tingkat (*soft story effect*). Sebaliknya, bila kolom lebih kuat daripada balok, drift akan tersebar lebih merata sehingga risiko keruntuhan lokal pada satu lantai dapat diminimalkan.

Prinsip ini memastikan bahwa kolom tidak mengalami kegagalan lebih dahulu dibandingkan balok.

Rasio tulangan elemen struktur harus dipilih sedemikian rupa sehingga memenuhi ketentuan : $0,01 \leq \rho \leq 0,06$

1.6.3 Analisis Struktur Bangunan Tahan Gempa

1.6.3.1 Kategori Risiko Bangunan dan Faktor Keutamaan Gempa

Berdasarkan SNI 1726 : 2019 pasal 7.3.2.1 dan 7.3.2.2 ketidakberaturan struktur bangunan dapat dibedakan menjadi ketidakberaturan horizontal pada gambar 3 dan ketidakberaturan vertikal pada gambar 4 dengan prosedur analisis pada pasal 7.7.2 SNI 1726 : 2019. Prosedur yang digunakan terkait erat dengan berbagai parameter struktur bangunan tersebut, seperti parameter keutamaan bangunan dan parameter faktor keutamaan gempa serta kategori desain seismik berdasarkan parameter percepatan respon spektra pada periode 1 detik (S_1) dan parameter percepatan respon spektra pada periode pendek (S_{s1}). Karena itu, prosedur analisis struktur harus menggunakan salah satu jenis sistem yang diperbolehkan, dengan mempertimbangkan kategori desain seismik, sistem struktur yang diterapkan, karakteristik dinamis, serta tingkat keteraturan bangunan.

Untuk mengetahui dan menentukan gempa rencana haruslah meninjau perencanaan evaluasi struktur bangunan gedung dan non gedung serta berbagai bagian dan peralatannya secara umum. Gempa rencana ditetapkan sebagai gempa dengan kemungkinan terlampaui besarnya selama struktur bangunan 50 tahun adalah sebesar 2 %.

Untuk berbagai kategori risiko struktur bangunan gedung dan non gedung sesuai dengan Tabel 1 pengaruh gempa rencana terhadapnya harus dikalikan dengan faktor keutamaan gempa I_e menurut Tabel 2. kasus untuk struktur bangunan dengan kategori risiko IV, bila dibutuhkan pintu masuk untuk operasional dari struktur bangunan yang bersebelahan dengan kategori risiko, maka struktur bangunan yang bersebelahan tersebut harus didesain sesuai dengan kategori risiko struktur IV.

Tabel 1 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non Gedung untuk Beban Gempa

No	Jenis pemanfaatan	Kategori Risiko
1	Gedung dan non gedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk, antara lain: - Fasilitas pertanian, perkebunan, peternakan, dan perikanan - Fasilitas sementara - Gedung penyimpanan - Rumah jaga dan struktur kecil lainnya	I
2	Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I,II,III,IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: - Perumahan	II

- Rumah toko dan rumah kantor
- Pasar
- Gedung perkantoran
- Gedung Apartemen/ rumah susun
- Pusat perbelanjaan/ mall
- Bangunan industri
- Fasilitas manufaktur
- Pabrik

Gedung dan non gedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:

- Bioskop
- Gedung pertemuan
- Fasilitas Kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat
- Fasilitas penitipan anak
- Penjara
- Bangunan untuk orang jompo

3

Gedung dan non gedung, tidak termasuk ke dalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan massal terhadap kehidupan masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:

- Pusat pembangkit listrik biasa
- Fasilitas penanganan air
- Fasilitas penanganan limbah
- Pusat telekomunikasi

III

Gedung dan nongedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.

4

Gedung dan nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:

- Bangunan-bangunan monumental
 - Gedung sekolah dan fasilitas Pendidikan
 - Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan
 - Rumah ibadah
 - Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat
 - Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat
-

IV

- Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya
- Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat
- Pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat
- Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangki air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat

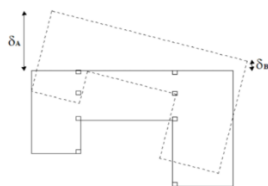
Gedung dan nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.

Sumber : SNI 1726 : 2019

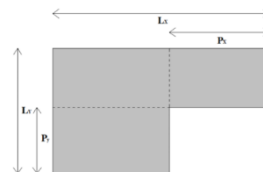
Tabel 2 Faktor Keutamaan Gempa

Kategori risiko	Faktor keutamaan Gempa, I_e
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,50

Sumber : SNI 1726 : 2019



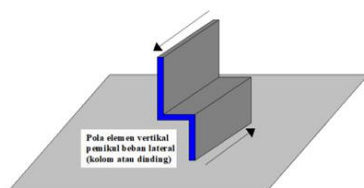
(a) Ketidakberaturan 1a dan 1b



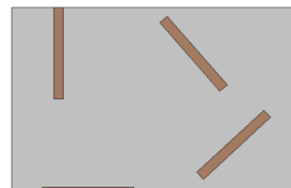
(b) Ketidakberaturan 2



(c) Ketidakberaturan 3



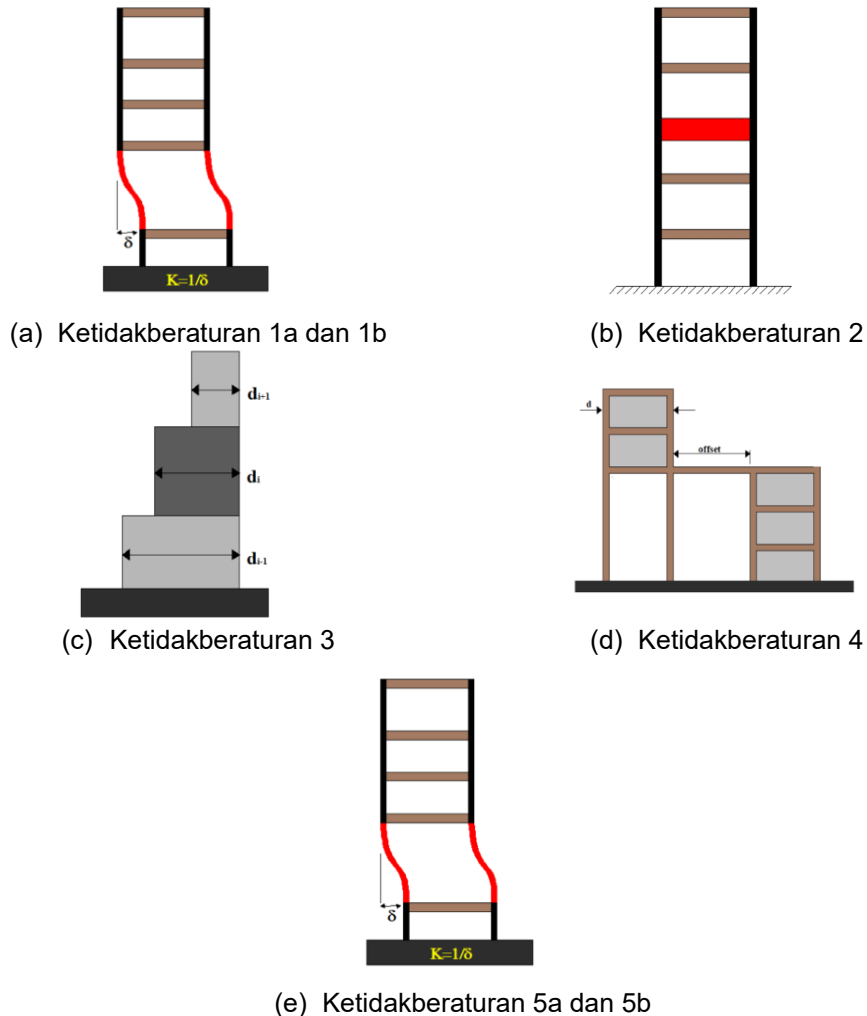
(d) Ketidakberaturan 4



(e) Ketidakberaturan 5

Gambar 1 Ketidakberaturan Horizontal

Sumber : SNI 1726 : 2019



(e) Ketidakberaturan 5a dan 5b
Gambar 2 Ketidakberaturan vertical

Sumber : SNI 1726 : 2019

1.6.3.2 Struktur Penahan Gaya Seismik

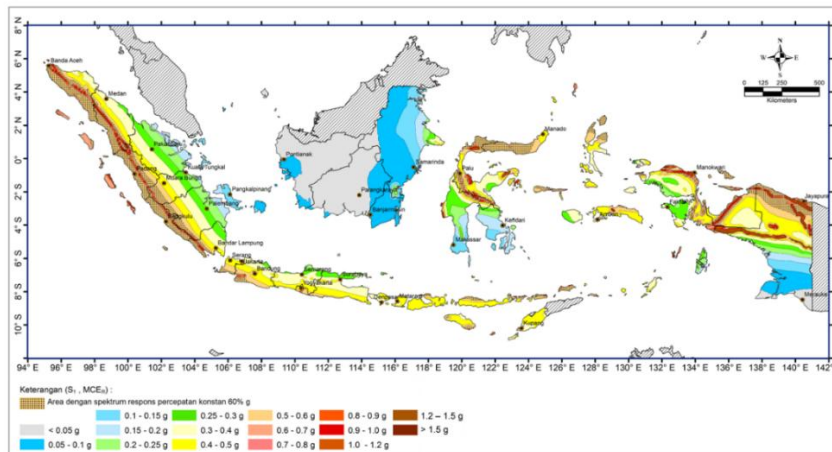
Setiap tipe dibagi berdasarkan tipe elemen vertikal yang digunakan untuk menahan gaya seismik lateral. Setiap sistem penahan gaya seismik yang dipilih harus dirancang sesuai dengan persyaratan khusus bagi sistem yang telah ditetapkan. Di dalam SNI 1726 : 2019 pasal 7.2, sistem struktur penahan gaya seismik ditentukan oleh parameter berikut ini:

1. Faktor koefisien modifikasi respons (R)

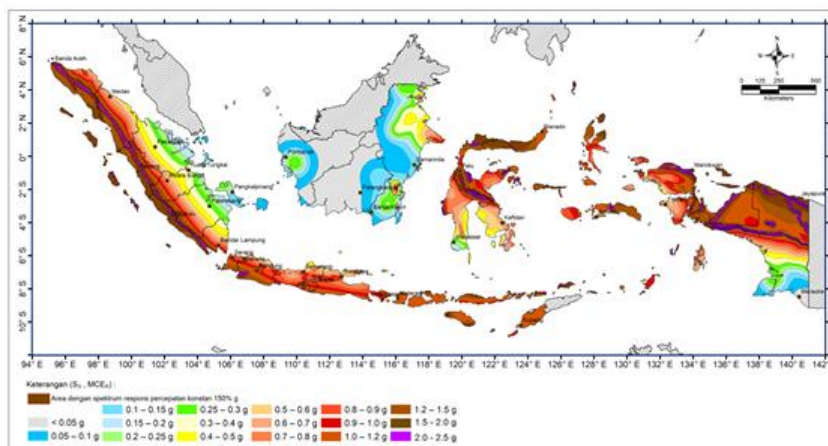
2. Faktor kuat lebih sistem (Ω)
3. Faktor pembesaran defleksi (C_d)
4. Faktor batasan tinggi sistem struktur (I)

1.6.3.3 Peta Wilayah Gempa

Berdasarkan SNI 1726:2019 pasal 14, ditetapkan berdasarkan parameter S_s (Percepatan batuan dasar pada periode pendek 0,2 detik) dan S_1 (Percepatan batuan dasar pada periode 1 detik) yang dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 3 Parameter gerak tanah, S_1 , gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) wilayah Indonesia untuk spektrum respons 0,2- detik (redaman kritis 5 %) (SNI 1726 : 2019)



Gambar 4 Parameter gerak tanah, S_{s1} , gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) wilayah Indonesia untuk spektrum respons 0,2- detik (redaman kritis 5 %) (SNI 1726 : 2019)

1.6.3.4 Respons Spektrum Desain

Respon spektra didefinisikan sebagai nilai respons maksimum yang ditunjukkan oleh suatu sistem struktur dengan satu derajat kebebasan, *Single Degree of Freedom (SDOF)*, yang meliputi percepatan (a), kecepatan (v), dan perpindahan (d), ketika sistem tersebut dikenai beban luar tertentu. Pada grafik respons spektra, sumbu absis merepresentasikan periode alami struktur, sedangkan sumbu ordinat menunjukkan besarnya respons maksimum. Kurva respons spektra menggambarkan nilai maksimum simpangan relatif (S_d), kecepatan relatif (S_v), serta percepatan relatif (S_a) yang dialami oleh sistem struktur.

Berdasarkan SNI 1726 : 2019 pasal 6.1, respons spektra desain harus ditentukan dan dimuat terlebih dahulu berdasarkan data-data yang ada. Data-data yang dibutuhkan dan prosedur untuk pembuatan respons spektra berdasarkan SNI 1726 : 2019 pasal 6.1 adalah:

a. Parameter Percepatan Terpetakan

Parameter S_s (percepatan batuan dasar pada periode pendek) dan S_1 (percepatan batuan dasar pada periode 1 detik) harus ditetapkan masing-masing dari respons spektral percepatan 0,2 detik dan 1 detik dalam peta gerak tanah seismik pada Pasal 15 dengan kemungkinan 2 % terlampaui dalam 50 tahun (MCER 2 % dalam 50 tahun), dan dinyatakan dalam bilangan desimal terhadap percepatan gravitasi. Bila $S_1 \leq 0,04 g$ dan $S_a \leq 0,15 g$ maka struktur bangunan boleh dimasukkan ke dalam kategori desain seismik A.

b. Kelas Situs

Berdasarkan sifat-sifat tanah pada situs, maka situs harus diklasifikasi sebagai kelas situs SA, SB, SC, SD, SE, atau SF seperti pada tabel 3 yang mengikuti SNI 1726 : 2019 pasal 5.3. Bila sifat-sifat tanah tidak teridentifikasi secara jelas sehingga tidak bisa ditentukan kelas situs-nya, maka kelas situs SE dapat digunakan kecuali jika pemerintah/dinas yang berwenang memiliki data geoteknik yang dapat menentukan kelas situs lainnya.

Jika penyelidikan tanah yang dilakukan sesuai dengan Pasal 5 menunjukkan adanya kondisi batuan yang konsisten dengan kelas situs SB, tetapi tidak dilakukan pengukuran kecepatan gelombang geser situs-spesifik, maka koefisien situs F_a , F_v dan F_{FGA} harus diambil sebesar 1,0.

Tabel 3 Klasifikasi Situs

Kelas Situs	$\bar{V}_s$ (m / det)	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100

Sumber : SNI 1726 : 2019

Tabel 4 Klasifikasi Situs (Lanjutan)

Kelas Situs	$\bar{V}_s$ (m / det)	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut : 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$ 2. Kadar air, $w \geq 40\%$ 3. Kuat geser niralir, $S_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m) - Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan indeks plastisitas $PI > 75$) Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $S_u < 50$ kPa		

Sumber : SNI 1726 : 2019

- c. Koefisien – koefisien situs dan parameter-parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget MCE_R

Koefisien situs dan parameter respons spektral percepatan gempa maksimum dengan tingkat risiko terarget, *Maximum Considered Earthquake Risk-Targeted* MCE_R digunakan sebagai dasar dalam penentuan respons spektral percepatan gempa di permukaan tanah. Dalam proses penentuannya, diperlukan faktor amplifikasi seismik pada periode 0,2 detik dan periode 1 detik. Faktor amplifikasi tersebut mencakup faktor amplifikasi percepatan untuk getaran dengan periode pendek (F_a) serta faktor amplifikasi percepatan yang merepresentasikan respons getaran pada periode 1 detik (F_v). Parameter respons spektral percepatan pada periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs, harus ditentukan dengan perumusan berikut ini:

$$S_{MS} = F_a \cdot S_s \quad (4)$$

$$S_{M1} = F_v \cdot S_1 \quad (5)$$

Keterangan :

S_s = parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode pendek;

S_1 = parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode 1,0 detik.

Dengan koefisien situs F_a dan F_v mengikuti yang mana dapat dilihat pada Tabel 5 dan Tabel 6

Tabel 5 Koefisien Situs, F_a

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-target (MCE_R) ter petakan pada periode pendek, $T = 0,2$ detik, S_s					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s \leq 0,5$	$S_s \leq 0,75$	$S_s \leq 1,0$	$S_s \leq 1,25$	$S_s \leq 1,55$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	SS ^(a)					

Sumber : SNI 1726 : 2019

Catatan : SS = situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik.

Tabel 6 Koefisien Situs, F_v

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-target (MCE_R) ter petakan pada periode pendek, T $= 1$ detik, S_1					
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 \leq 0,2$	$S_1 \leq 0,3$	$S_1 \leq 0,4$	$S_1 \leq 0,5$	$S_1 \leq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	SS ^(a)					

Sumber : SNI 1726 : 2019

Catatan : SS = situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik.

- d. Parameter percepatan spektral desain
Parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek, (S_{DS}) dan pada periode 1 detik, (S_{DS}) harus ditentukan melalui perumusan berikut ini:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (6)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} \cdot S_{M1} \quad (7)$$

Dimana :

S_{DS} = Respon spektra pecepatan desain untuk perioda pendek

S_{D1} = Respon spektra percepatan desain untuk periode 1,0 detik

e. Prosedur pembuatan respons spektra desain berdasarkan SNI 1726:2019

Berikutnya, untuk mendapatkan kurva spektrum desain harus dikembangkan dengan mengacu pada gambar 5 dan mengikuti ketentuan dibawah ini :

1. Untuk periode yang lebih kecil dari T_0 , spektrum respons percepatan desain, S_a , harus diambil dari persamaan;

$$S_a = S_{DS}(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0}) \quad (8)$$

2. Untuk periode lebih besar dari atau sama dengan T_0 , dan lebih kecil dari atau sama dengan T_S , spektrum respons percepatan desain, S_a , sama dengan S_{DS} :
3. Untuk periode lebih besar dari T_S tetapi lebih kecil dari atau sama dengan T_L , respons spektral percepatan desain, S_a , diambil berdasarkan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (9)$$

4. Untuk periode lebih besar dari T_L , respons spektral percepatan desain, diambil S_a berdasarkan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1}T_L}{T^2} \quad (10)$$

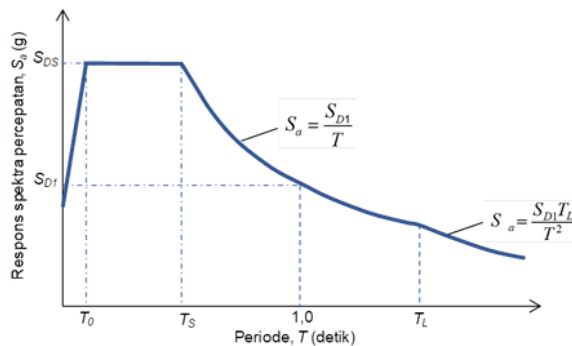
Keterangan :

T = periode getar fundamental struktur.

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (11)$$

$$T_S = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (12)$$

T_L = peta transisi periode panjang yang ditunjukkan pada gambar dibawah



Gambar 5 Spektrum desain

Sumber : SNI 1726 : 2019

Setiap bangunan memiliki faktor prioritas yang ditentukan oleh tingkat kepentingannya. Bangunan dengan tingkat kepentingan tinggi direncanakan agar memiliki keandalan serta umur layanan yang lebih panjang dibandingkan bangunan pada umumnya. Penetapan faktor prioritas ini dipengaruhi oleh berbagai pertimbangan, antara lain tingkat intensitas gempa yang direncanakan, periode ulang gempa, ketinggian bangunan, serta fungsi bangunan dalam upaya perlindungan keselamatan manusia. Pengelompokan tersebut merupakan bagian dari filosofi perencanaan struktur tahan gempa (*earthquake design philosophy*) dalam menghadapi beban gempa. Filosofi desain yang dimaksud adalah sebagai berikut:

1. Pada gempa kecil (*light* atau *minor earthquake*) yang sering terjadi, maka struktur utama bangunan harus tidak rusak dan berfungsi dengan baik. Kerusakan kecil yang masih dapat ditoleransi pada elemen non-struktur masih dibolehkan.
2. Pada gempa menengah (*moderate earthquake*) yang relatif jarang terjadi, maka struktur utama bangunan boleh rusak/retak ringan tapi masih dapat diperbaiki. Elemen nonstruktur dapat saja rusak tetapi masih dapat diganti yang baru.
3. Pada gempa kuat (*strong earthquake*) yang jarang terjadi, maka struktur bangunan boleh rusak tetapi tidak boleh runtuh total (*totally collapse*). Kondisi seperti ini juga diharapkan pada gempa besar (*great earthquake*), yang tujuannya adalah melindungi penghuni bangunan secara maksimum.

Perilaku material, elemen struktur, serta sistem struktur secara keseluruhan merupakan aspek fundamental dalam pengembangan konsep bangunan tahan gempa. Ditinjau dari hubungan antara beban dan responsnya, perilaku material dapat bersifat linier maupun nonlinier, sementara besarnya intensitas beban dapat menghasilkan respons elastik atau inelastik. Kombinasi dari kedua karakteristik tersebut menghasilkan empat jenis perilaku struktur, yaitu sebagai berikut :

1. Perilaku linier elastik
Perilaku linier elastik ditandai oleh hubungan antara beban dan simpangan yang bersifat proporsional atau linier. Apabila beban dihilangkan, material atau elemen

struktur akan kembali ke kondisi semula tanpa mengalami deformasi permanen. Material logam, khususnya baja, umumnya menunjukkan perilaku linier elastik selama masih berada pada tingkat pembebanan yang relatif rendah.

2. Perilaku non-linier elastik

Pada perilaku nonlinier elastik, hubungan antara beban dan simpangan sejak awal pembebanan tidak lagi berbentuk linier, meskipun intensitas beban masih tergolong kecil. Namun demikian, apabila beban diiadakan, deformasi yang terjadi sepenuhnya pulih sehingga tidak menimbulkan deformasi permanen. Material seperti tanah dan beton pada umumnya memperlihatkan karakteristik nonlinier elastik sejak tahap awal pembebanan.

3. Perilaku linier inelastik

Perilaku linier inelastik terjadi ketika struktur mengalami pembebanan dengan intensitas yang cukup besar sehingga tegangan yang timbul telah melampaui batas elastik dan memasuki kondisi inelastik. Dalam keadaan ini, apabila beban dihilangkan, struktur tidak kembali ke posisi awal, melainkan menyisakan deformasi permanen, meskipun hubungan beban dan deformasi masih dimodelkan secara linier. Pada praktik analisis, struktur beton yang mengalami pembebanan siklik besar secara nyata berperilaku nonlinier inelastik, namun sering kali disederhanakan dengan pemodelan linier inelastik.

4. Perilaku non-linier inelastik

Perilaku nonlinier inelastik muncul pada struktur yang dikenai pembebanan siklik dengan intensitas besar, seperti pada tanah dan beton akibat gempa kuat. Hubungan antara beban dan deformasi tidak lagi bersifat linier, dan setelah beban diiadakan, struktur akan mengalami deformasi permanen yang signifikan.

1.6.3.5 Kategori Desain Seismik

Struktur harus ditetapkan memiliki suatu kategori desain seismik yang mengikuti pasal ini. Struktur dengan kategori risiko I, II atau III yang berlokasi di mana parameter respons spektral percepatan terpetakan pada 1 detik, S_T lebih besar dari atau sama dengan 0,75 harus ditetapkan sebagai struktur dengan kategori desain seismik E. Struktur yang berkategori risiko IV yang berlokasi dimana parameter respons spektral percepatan terpetakan pada 1 detik, S_T , lebih besar dari atau sama dengan 0,75, harus ditetapkan sebagai struktur dengan kategori desain seismik F. semua struktur lainnya harus ditetapkan kategori desain seismiknya berdasarkan kategori risikonya dan parameter respons spektral percepatan desainnya. Masing-masing bangunan dan struktur harus ditetapkan ke dalam kategori desain seismik yang lebih terarah, dengan mengacu pada Tabel 6 dan Tabel 7, terlepas dari nilai periode fundamental getaran struktur, T .

Apabila S_T lebih kecil dari 0,75, kategori desain seismik diizinkan untuk ditentukan sesuai dengan Tabel 7 dan Tabel 8, dimana berlaku ketentuan di bawah ini:

1. Pada masing-masing dua arah ortogonal, perkiraan periode fundamental struktur, T_a , yang ditentukan sesuai dengan 0 kurang dari $0,8T_s$, dimana T_s ditentukan sesuai dengan 0;
2. Pada masing-masing dua arah ortogonal, periode fundamental struktur yang digunakan untuk menghitung simpangan antar tingkat adalah kurang dari T_s ;

3. Pada persamaan $C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)}$ digunakan untuk menentukan koefisien respons seismik, C_s ;
4. Diafragma struktural adalah kaku sebagaimana disebutkan di 0 atau untuk diafragma yang fleksibel, jarak antara elemen-elemen vertikal pemikul gaya seismik tidak melebihi 12 m.

Tabel 7 Kategori Desain Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Periode Pendek

Nilai S_{DS}	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{DS} < 0,167$	A	A
$0,167 \leq S_{DS} \leq 0,33$	B	C
$0,33 \leq S_{DS} \leq 0,5$	C	D
$0,5 \leq S_{DS}$	D	D

Sumber : SNI 1726 : 2019

Tabel 8 Kategori Desain Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Periode 1 Detik

Nilai S_{DS}	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{DS} < 0,067$	A	A
$0,067 \leq S_{DS} \leq 0,133$	B	C
$0,133 \leq S_{DS} \leq 0,20$	C	D
$0,20 \leq S_{DS}$	D	D

Sumber : SNI 1726 : 2019

1.6.3.6 Analisis Ragam Spektrum Respons

Metode analisis ragam respons spektrum didasarkan pada asumsi bahwa respons atau simpangan total struktur merupakan hasil kontribusi dari masing-masing ragam getaran. Besarnya respons pada setiap ragam ditentukan berdasarkan spektrum respons gempa rencana maksimum sesuai dengan parameter respons gabungan. Secara umum, setiap ragam getaran mencapai nilai respons maksimumnya pada waktu yang berbeda, sehingga respons maksimum dari berbagai ragam tersebut tidak dapat dijumlahkan secara langsung. Mengacu pada SNI 1726:2019 Pasal 7.9.1.1, nilai akhir respons dinamik struktur bangunan akibat pengaruh gempa rencana pada suatu arah tertentu tidak diperkenankan lebih kecil dari 90% nilai respons yang dihasilkan oleh ragam pertama.

1.6.4 Pembebanan dan Kombinasi Pembebanan Struktur

Dalam melakukan analisis desain suatu struktur bangunan, perlu adanya gambaran jelas mengenai perilaku dari bangunan yang didesain, tentunya haruslah mengetahui juga bDalam melakukan analisis desain suatu struktur bangunan, perlu adanya gambaran jelas mengenai perilaku dari bangunan yang didesain, tentunya haruslah mengetahui juga beban yang bekerja pada strukturnya. Pada penelitian ini beban-beban yang akan digunakan dalam perancangan adalah kombinasi dari 3 beban.

yaitu beban mati (*Dead Load*), beban hidup (*Live Load*), dan beban Gempa (*Earthquake Load*) yang bekerja pada strukturnya. Pada penelitian ini beban-beban yang akan digunakan dalam perancangan adalah kombinasi dari 3 beban yaitu beban mati (*Dead Load*), beban hidup (*Live Load*), dan beban Gempa (*Earthquake Load*).

1.6.4.1 Beban Mati (*Dead Load*)

Beban mati adalah berat dari semua bagian dari suatu gedung yang bersifat tetap, termasuk segala unsur tambahan, penyelesaian-penyelesaian, mesin-mesin, serta peralatan tetap yang merupakan bagian yang tak terpisahkan dari gedung itu. Jenis-jenis beban mati yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 9 dan Tabel 10.

Tabel 9 Berat Sendiri Bahan Bangunan

Bahan Bangunan	Beban	Satuan
Baja	7850	kg/m ³
Batu alam	2600	kg/m ³
Batu belah, batu bulat, batu gunung (berat bertumpuk)	1500	kg/m ³
Batu karang (berat tumpuk)	700	kg/m ³
Batu pecah	1450	kg/m ³
Besi tuang	7250	kg/m ³
Beton ⁽¹⁾	2200	kg/m ³
Beton bertulang ⁽²⁾	2400	kg/m ³
Kayu (Kelas 1) ⁽³⁾	1000	kg/m ³
Kerikil, koral (kering udara sampai lembab, tanpa diayak)	1650	kg/m ³
Pasangan batu belah, batu bulat, batu gunung	2200	kg/m ³
Pasangan batu cetak	2200	kg/m ³
Pasangan batu karang	1450	kg/m ³
Pasir (kering udara sampai lembab)	1600	kg/m ³
Pasir (jenuh air)	1800	kg/m ³
Pasir kerikil, koral (kering udara sampai lembab)	1850	kg/m ³
Tanah, lempung dan lanau (kering udara sampai lembab)	1700	kg/m ³
Tanah, lempung dan lanau (basah)	2000	kg/m ³
Tanah hitam (timbal)	1140	kg/m ³

Sumber : Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung 1983

Tabel 10 Berat Sendiri Komponen Gedung

Komponen Gedung	Beban	Satuan
Adukan per cm tebal:		
- Dari semen	21	kg/m ³
- Dari kapur, semen meras tas	17	
Aspal, termasuk bahan-bahan mineral penambah, per cm tebal	14	kg/m ³
Dinding pasangan batu bata merah:		
- Satu batu	450	kg/m ³
- Setengah batu	250	

Sumber : Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung 1983

Tabel 11 Berat Sendiri Komponen Gedung (Lanjutan)

Komponen Gedung	Beban	Satuan
-----------------	-------	--------

Dinding pasangan batako:		
- Berlubang:		
• Tebal dinding 20 cm (HB 20)	200	kg/m ³
• Tebal dinding 10 cm (HB 10)	120	
- Tanpa lubang:		
• Tebal dinding 15 cm	300	
• Tebal dinding 10 cm	200	
Langit-langit dan dinding (termasuk rusuk rusuknya, tanpa penggantung langit-langit atau paku), terpadu dari:		
- Semen abses (<i>eternity</i> dan bahan lain sejenis), dengan tebal maksimum 4 mm	11	kg/m ³
- Kaca, dengan tebal 3-4 mm.	10	
Penggantung langit-langit (dari kayu), dengan bentang maksimum 5 m dan jarak s.k.s. minimum 0,80 m.	40	kg/m ³
Penutup atap genting dengan reng dan usuk / kaso, per m ² bidang atap	50	kg/m ³
Penutup atap sirap dengan reng dan usuk / kaso, per m ² bidang atap	40	kg/m ³
Penutup atap seng gelombang (BWG 24) tanpa gording	10	kg/m ³
Penutup lantai dari ubin semen Portland, teraso dan beton, tanpa adukan, per cm tebal	21	kg/m ³
Semen asbes gelombang (tebal 5 mm)	11	kg/m ³
Ducting AC dan penerangan	30,6	kg/m ³

Sumber : Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung 1983

1.6.4.2 Beban Hidup (*Live Load*)

Beban hidup adalah semua beban yang terjadi akibat penghunian atau penggunaan gedung, dan ke dalamnya termasuk beban-beban pada lantai yang berasal dari barang-barang yang dapat berpindah, serta peralatan yang tidak termasuk dalam bagian yang tak terpisahkan dari gedung dan dapat diganti selama masa hidup bangunan tersebut. Beban hidup yang terjadi di atap dapat termasuk beban yang berasal dari air hujan, baik akibat genangan maupun akibat jatuhnya air hujan. Pada beban hidup tidaklah termasuk beban angin.

1.6.4.3 Beban Gempa (*Earthquake Load*)

Beban gempa adalah semua beban statik ekuivalen yang bekerja pada gedung atau bagian gedung yang menentukan pengaruh dari gerakan tanah akibat gempa itu. Pengaruh gempa pada struktur gedung ditentukan berdasarkan suatu Analisa dinamik, maka yang diartikan dengan gempa di sini adalah gaya-gaya di dalam struktur tersebut yang terjadi oleh Gerakan tanah akibat gempa.

Struktur bangunan gedung terdiri dari struktur atas dan struktur bawah. Struktur atas merupakan struktur yang terletak di atas muka tanah. Struktur atas terdiri dari balok, kolom, dan *shear wall*. Sedangkan struktur bawah merupakan struktur yang terletak di bawah tanah yang merupakan bagian gedung yaitu *basement* atau fondasi. Menurut SNI-03-1726-2019 komponen-elemen struktur dan elemen-elemen fondasi harus didesain sedemikian hingga kuat rencananya sama atau melebihi pengaruh beban-beban ter faktor dengan kombinasi-kombinasi sebagai di bawah. Pengaruh adanya satu

atau lebih beban yang tidak bekerja harus ditinjau. Pengaruh yang paling menentukan dari beban-beban angin dan seismik harus ditinjau, tetapi kedua beban tersebut tidak perlu ditinjau secara simultan.

Kombinasi-kombinasi pembebanan untuk pembebanan dasar metode ultimit dapat dilihat sebagai berikut:

$$1. \quad 1,4D \quad (13)$$

$$2. \quad 1,2D + 1,6L + 0,5(Lr \text{ atau } R) \quad (14)$$

$$3. \quad 1,2D + 1,6(Lr \text{ atau } R) + (L \text{ atau } 0,5W) \quad (15)$$

$$4. \quad 1,2D + 1,0W + 0,5(Lr \text{ atau } R) \quad (16)$$

$$5. \quad 0,9D + 1,0W \quad (17)$$

Menurut SNI 1726:2019 apabila suatu struktur menerima pengaruh beban seismik, maka kombinasi-kombinasi beban berikut harus diperhitungkan Bersama dengan kombinasi beban dasar diatas. Pengaruh beban seismik yang paling menentukan harus ditinjau, tetapi tidak perlu diperhitungkan secara bersamaan dengan beban angin. Berikut adalah beban seismik yang harus digunakan:

$$6. \quad 1,2D + E_v + E_h + L \quad (18)$$

$$7. \quad 0,9D + E_v + E_h \quad (19)$$

Kombinasi-kombinasi pembebanan untuk pembebanan dasar metode tegangan ijin dapat dilihat sebagai berikut:

$$1. \quad D \quad (20)$$

$$2. \quad D + L \quad (21)$$

$$3. \quad D + (Lr \text{ atau } R) \quad (22)$$

$$4. \quad D + 0,75L + 0,75(Lr \text{ atau } R) \quad (23)$$

$$5. \quad D + 0,6W \quad (24)$$

$$6. \quad D + 0,75(0,6W) + 0,75L + 0,75(Lr \text{ atau } R) \quad (25)$$

$$7. \quad 0,6D + 0,6W \quad (26)$$

Kombinasi-kombinasi pembebanan untuk pembebanan seismik metode tegangan ijin dapat dilihat sebagai berikut:

$$8. \quad 1,0D + 0,75E_v + 0,7E_h \quad (27)$$

$$9. \quad 1,0D + 0,525E_v + 0,525E_h + 0,75L \quad (28)$$

$$10. \quad 0,6D - 0,7E_v + 0,7E_h \quad (29)$$

Penguraian kombinasi pembebanan di atas tidak semua akan dicantumkan dalam permodelan dikarenakan beban angin dan beban hujan tidak termasuk dalam tinjauan perhitungan. Beban yang bekerja pada struktur gedung atau standar dari beton yang berlaku telah diatur sedemikian rupa untuk memperoleh beban yang paling ekstrem. Dari kombinasi-kombinasi yang telah diuraikan di atas, menurut SNI-03-1726-2019 maka, kombinasi pembebanan yang dipakai dalam penelitian ini adalah:

$$a. \quad U = 1,4D \quad (30)$$

$$b. \quad U = 1,2D + 1,6L \quad (31)$$

- c. $U = 1,2D + 1,6L + 1,0E_h + 0,3E_v$ (32)
- d. $U = 1,2D + 1,6L + 1,0E_h - 0,3E_v$ (33)
- e. $U = 1,2D + 1,6L - 1,0E_h + 0,3E_v$ (34)
- f. $U = 1,2D + 1,6L - 1,0E_h - 0,3E_v$ (35)
- g. $U = 1,2D + 1,6L + 0,3E_h + 1,0E_v$ (36)
- h. $U = 1,2D + 1,6L + 0,3E_h - 1,0E_v$ (37)
- i. $U = 1,2D + 1,6L - 0,3E_h + 1,0E_v$ (38)
- j. $U = 1,2D + 1,6L - 0,3E_h - 1,0E_v$ (39)
- k. $U = 1,0D + 0,5L$ (40)

Dimana :

- D = Beban Mati
- L = Beban Hidup
- Ev = Beban Gempa Vertikal
- Eh = Beban Gempa Horizontal
- Lr = Beban Hidup di Atap
- R = Beban Air Hujan
- W = Beban Angin

1.6.5 Kolom Bulat (Silinder) dan Kolom Persegi

Kolom beton bertulang merupakan elemen utama dalam struktur bangunan yang berfungsi menahan beban aksial dan lateral akibat gempa. Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian menunjukkan bahwa bentuk penampang kolom memiliki pengaruh signifikan terhadap perilaku seismik struktur, khususnya dalam hal kekakuan, daktilitas, dan kemampuan disipasi energi.

Kolom silinder umumnya menunjukkan kinerja seismik yang lebih baik dibandingkan kolom persegi, terutama dalam kondisi pembebanan siklik akibat gempa. Hal ini disebabkan oleh distribusi tegangan yang lebih merata pada seluruh penampang serta tidak adanya sudut tajam yang dapat menjadi titik konsentrasi tegangan. Zhao et al., (2026) melalui penelitiannya menunjukkan bahwa kolom berbentuk lingkaran memiliki perilaku histeretik yang lebih stabil dan kapasitas disipasi energi yang lebih tinggi dibandingkan kolom persegi ketika diuji dengan beban aksial dan lateral siklik. Selain itu, efektivitas pengekanan pada kolom silinder, terutama yang menggunakan tulangan spiral, memberikan kontribusi besar terhadap peningkatan daktilitas. Lee et al., (2025) melalui eksperimentalnya menunjukkan bahwa kolom silinder dengan daerah sendi plastis yang terkekang dengan baik mampu mempertahankan kekuatan dan mengalami deformasi yang lebih besar sebelum mengalami keruntuhan. Hal ini menunjukkan bahwa kolom silinder lebih mampu menyerap energi gempa dan mengurangi risiko kegagalan getas (*brittle failure*).

Di sisi lain, kolom persegi memiliki karakteristik yang berbeda. Meskipun lebih mudah dalam pelaksanaan konstruksi dan integrasi dengan elemen struktur lainnya, kolom persegi cenderung mengalami konsentrasi tegangan pada sudut penampang. Penelitian yang dilakukan oleh Njiru dan Mamaghami (2024) menunjukkan bahwa kolom persegi mengalami degradasi kekuatan dan daktilitas yang lebih cepat akibat fenomena *buckling* lokal dan interaksi gaya dalam pada kondisi pembebanan siklik. Namun demikian, beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa dalam kondisi tertentu, terutama pada pembebanan siklik dengan kontrol lentur, kolom persegi dapat menunjukkan kapasitas siklik yang cukup baik bahkan lebih tinggi dalam jumlah siklus beban dibandingkan kolom silinder, meskipun dengan deformasi yang lebih besar.

Penelitian lain juga menunjukkan bahwa bentuk penampang kolom memengaruhi mekanisme keruntuhan dan distribusi sendi plastis. Kolom silinder cenderung menghasilkan pola keruntuhan yang lebih stabil dan merata, sedangkan kolom persegi lebih rentan terhadap konsentrasi kerusakan pada area tertentu, terutama di sudut penampang. Selain itu, parameter seperti rasio aksial, rasio kelangsingan, dan konfigurasi tulangan transversal juga sangat memengaruhi kinerja kedua jenis kolom tersebut dalam menahan beban gempa (Duen et al., 2024).

1.6.6 Analisis Statik Non-Linier (*Pushover Analysis*)

Analisis statik non-linier atau bisa disebut dengan *pushover analysis* merupakan salah satu sebuah sarana untuk memberikan solusi berdasarkan *performance based design* yang pada intinya bertujuan untuk mencari kapasitas struktur bangunan. Prosedur kerja dari *pushover analysis* ini dengan memberikan sebuah beban statis dalam arah lateral yang ditingkatkan secara bertahap hingga mencapai target *displacement* tertentu atau mencapai keruntuhan. Hasil dari *pushover analysis* yang telah dilakukan dapat diketahui nilai-nilai dari gaya geser dasar untuk perpindahan lantai atap tertentu, sehingga nilai tersebut dapat digunakan untuk memetakan menjadi kurva kapasitas dari struktur. Selain dari mendapatkan nilai-nilai tersebut, *pushover analysis* juga dapat menunjukkan secara visual perilaku struktur saat dalam kondisi elastis, plastis dan hingga mencapai keruntuhan pada elemen-elemen strukturnya.

Hasil dari analisis *pushover* berupa kurva *pushover* yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar (V) dan perpindahan lateral titik kontrol di atap (D). Selama proses pembebanan, struktur didorong hingga mengalami leleh pada satu atau beberapa elemen struktural.

Menurut Wiryanto (2006) pada Abdillah (2023), analisis *pushover* dapat digunakan alat bantu perencanaan tahan gempa, asalkan menyesuaikan dengan keterbatasan yang ada, yaitu:

1. Hasil analisis *pushover* masih berupa suatu pendekatan, karena bagaimanapun perilaku gempa yang sebenarnya adalah bersifat bolak-balik melalui suatu siklus tertentu, sedangkan sifat pembebanan pada analisis *pushover* adalah *statik monotonik*.
2. Pemilihan pola beban lateral yang digunakan dalam analisis adalah sangat penting.

3. Untuk membuat model analisis non-linier akan lebih rumit dibanding model analisis linier. Model tersebut harus memperhitungkan karakteristik *inelastic* beban-deformasi dari elemen-elemen yang penting.

Analisis *pushover* dilakukan dalam 2 tahapan yaitu pembebanan gravitasi kemudian dilanjutkan dengan pembebanan lateral. Pembebanan gravitasi diberikan secara bertahap yang besarnya ditingkatkan hingga sampai pada beban yang didefinisikan. Setelah pembebanan gravitasi dilakukan kemudian dilanjutkan dengan memberikan beban lateral pada struktur yang besarnya meningkat secara bertahap hingga tercapai salah satu kondisi, yang mana kondisi tersebut adalah:

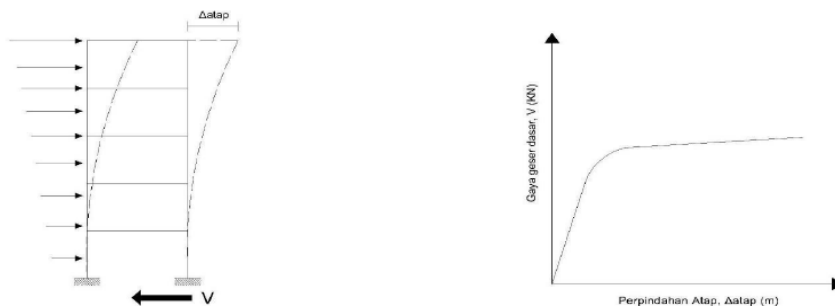
1. *Displacement* titik kontrol mencapai *displacement* target yaitu 2% dari total tinggi bangunan (SNI 1726:2019)
2. Bangunan tidak dapat mengalami *displacement* lebih lanjut akibat ketidakstabilan yang ditimbulkan sendi plastis.

1.6.7 Metode Spektrum Kapasitas ATC-40

1.6.7.1 Kurva Kapasitas (Capacity Curve)

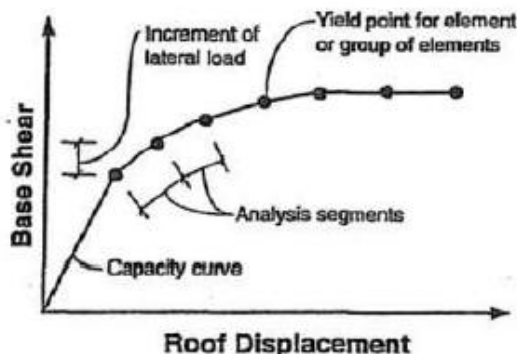
Kurva kapasitas menggambarkan kekuatan struktur yang besarnya sangat tergantung dari kemampuan deformasi dari masing-masing komponen struktur. Cara termudah dalam membuat kurva ini adalah dengan cara mendorong struktur secara bertahap dengan mencatat hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan atap akibat beban lateral yang dikerjakan dengan pola pembebanan tertentu.

Menurut Nugraha (2017) pada Abdillah (2023) kurva kapasitas terdiri dari tiga titik yakni titik awal, titik leleh dan titik ultimit. Pada analisis *Pushover*, titik leleh dapat didefinisikan sebagai gaya geser yang diperlukan agar tercapainya kapasitas komponen pada struktur bangunan. Sedangkan titik ultimit adalah gaya geser yang timbul pada komponen struktur setelah titik leleh. Titik ultimit lebih rendah daripada kapasitas titik leleh, Namun kapasitas gaya geser ultimit mewakili struktur yang lebih *flexible* yang memiliki *fundamental period* yang Panjang dan dapat terjadi pada beberapa posisi yang diinginkan respons spektrum.



Gambar 6 Kapasitas Gaya Geser (V) – Roof Displacement Δ_{roof}

Sumber : ATC-40, 1996 (Abdillah, 2024)

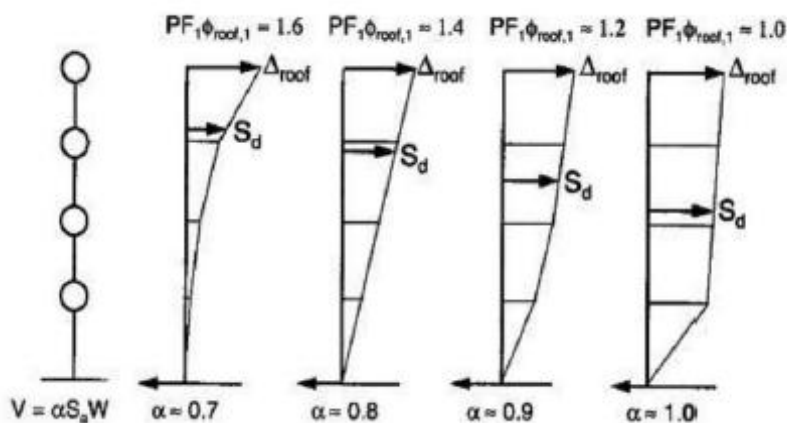


Gambar 7 Kurva kapasitas

Sumber : ATC-40, 1996 (Hasibuan, 2023)

Capacity spectrum method menyajikan secara grafis dua buah grafik yang disebut spektrum, yaitu spektrum kapasitas (*capacity spectrum*) yang menggambarkan kapasitas struktur berupa hubungan gaya dorong total (*base shear*) dan perpindahan lateral struktur (biasanya ditetapkan di puncak bangunan), dan spektrum *demand* yang menggambarkan besarnya *demand* (tuntutan kinerja) akibat gempa dengan periode ulang tertentu. Kinerja bangunan berdasarkan metode spektrum kapasitas, ATC-40 mengatur dengan melihat batas deformasi.

Konversi kurva kapasitas dalam format *Acceleration-Displacement Response Spectra* (ADRS), untuk merubah kurva kapasitas ke dalam format ADRS atau menjadi kapasitas spektrum maka terdahulu dipahami tentang hubungan faktor partisipasi modal, modal koefisien massa, dan perpindahan bangunan. Hubungan tersebut dapat dilihat pada Gambar 8 berikut ini:



Gambar 8 Faktor Partisipasi Modal dan Modal Koefisien Massa

Sumber : ATC-40, 1996 (Abdillah, 2024)

Pada gambar di atas terlihat bahwa hubungan antara kurva partisipasi modal dan modal koefisien massa untuk nilai simpangan antara lantai yang berbeda di setiap bangunan. Untuk melakukan perubahan atau konversi kurva kapasitas ke dalam format ADRS digunakan suatu persamaan berubah. Persamaan pengubah yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$PF_1 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}) / g}{\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}^2) / g} \right] \quad (41)$$

$$a = \frac{[\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}) / g]^2}{[\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}) / g][\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}^2) / g]} \quad (42)$$

$$S_a = \frac{V/w}{a_1} \quad (43)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1 \phi_{roof.1}} \quad (44)$$

Keterangan:

PF_1 = faktor partisipasi modal pada mode lama

a_1 = modal koefisien massa pada mode lama

w_i/g = massa pada tingkat ke-i

ϕ_{i1} = amplitude mode-1 pada tingkat ke-i

V = gaya geser dasar

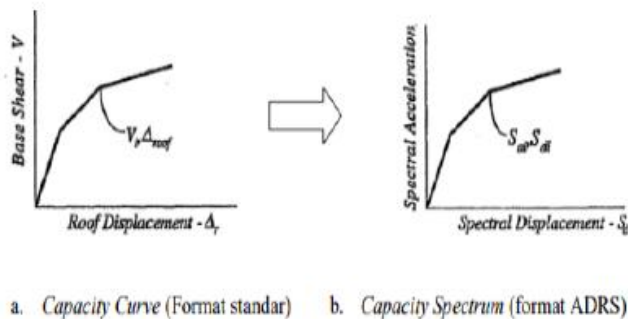
W = berat mati bangunan ditambah beban hidup

Δ_{roof} = roof displacement

S_a = spectral acceleration

S_d = spectral displacement

Pada proses merubah kurva kapasitas ke format *Acceleration-Displacement Response Spectra*, ADRS perhitungan pertama yang dilakukan adalah mencari nilai faktor partisipasi modal pada periode lama (PF_1) dan modal koefisien massa pada periode lama (a_1) menggunakan persamaan 1.41 dan 1.42, kemudian setiap poin pada kurva kapasitas, gaya geser dasar (V), *roof displacement* (Δ_{roof}), digunakan untuk dikonversikan ke poin *spectral acceleration* (S_a) dan *spectral displacement* (S_d) menggunakan persamaan 1.43 dan 1.44. berikut adalah modifikasi kurva kapasitas menjadi kurva kapasitas spektrum dengan format *Acceleration-Displacement Response Spectra*, dapat dilihat pada Gambar 9 berikut ini:



Gambar 9 Modifikasi Kurva Kapasitas Menjadi Kapasitas Spektrum dengan Format ADRS

Sumber : ATC-40, 1996 (Abdillah, 2024)

1.6.7.2 Spektrum *Demand*

Spektrum *demand* didapatkan dengan mengubah respons spektrum yang biasanya dinyatakan dalam spektral, kecepatan, S_a , dan spektral perpindahan S_d . Kurva kapasitas yang merupakan produk dari *pushover* dalam satuan gaya (kN) dan perpindahan (m), sedangkan *demand spectrum* memiliki satuan percepatan (m/detik²) dan perpindahan (m). Satuan dari kedua kurva tersebut perlu diubah dalam format yang sama.

Respons spektrum (*demand spectrum*) perlu diubah ke format ADRS agar dapat digunakan dengan kurva kapasitas, sehingga diperlukan persamaan untuk melakukan perubahan. Berikut adalah persamaan perubahan yang digunakan:

$$S_a = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a (g) \quad (45)$$

Atau

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{S_d}{S_a}} \quad (46)$$

Keterangan:

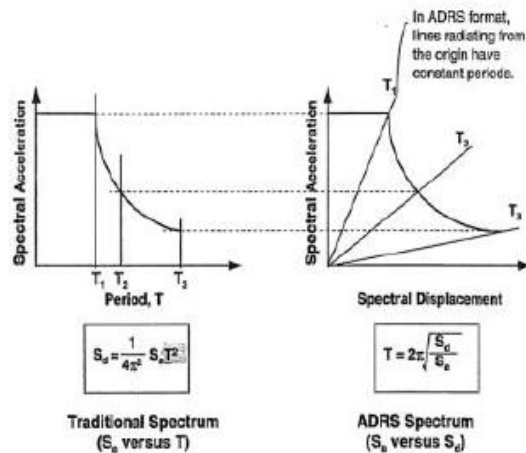
S_a = spektra percepatan (m),

S_d = spektra perpindahan (g),

g = percepatan gravitasi (9,81 m/s²),

T = periode getar fundamental (dt).

Berikut adalah perubahan format dari respons spektrum ke format ADRS, yang dapat dilihat pada Gambar 10 berikut ini:

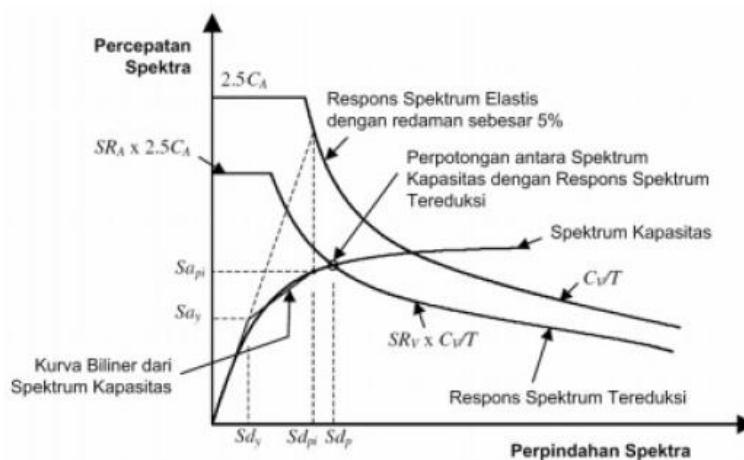


Gambar 10 Modifikasi Format Respons Percepatan ke Format ADRS

Sumber : ATC-40, 1996 (Abdillah, 2024)

1.6.7.3 Tingkat Kinerja Struktur

Menurut ATC-40 (1996) Titik kinerja (*performance point*) merupakan titik dimana kurva kapasitas berpotongan dengan kurva respons spektrum (*demand spectrum*). *Performance point* dapat mengetahui nilai periode bangunan dan redaman efektif akibat perubahan kekuatan struktur setelah terjadi sendi plastis. Penentuan nilai titik kinerja (*performance point*) membutuhkan iterasi yang akan dilakukan secara otomatis menggunakan program SAP2000. Penjelasan lebih lanjut mengenai *performance point* dapat dilihat pada Gambar 11 berikut ini:



Gambar 11 Penentuan *Performance Point*

Sumber : ATC-40, 1996 (Firdha, 2021)

Menurut Nugraha (2021) pada Abdillah (2023) titik kinerja merupakan perpotongan antara *capacity spectrum* dan *demand spectrum*. Dengan demikian titik kinerja merupakan representasi dari dua kondisi yaitu:

1. Karena terletak pada spektrum kapasitas, merupakan representasi kekuatan struktur pada suatu nilai perpindahan tertentu, dan
2. Karena terletak pada kurva *demand*, menunjukkan bahwa kekuatan struktur dapat memenuhi *demand* beban yang diberikan.

1.6.7.4 Batasan Deformasi (*Drift*) Menurut ATC-40

Batasan deformasi (*Drift*) telah diatur dalam metode ATC-40, yang mana metode tersebut digunakan untuk melakukan pengecekan terhadap *deformasi limit* berdasarkan tingkat kinerja pada metode ATC-40 (1996). *Deformasi limit* pada berbagai tingkat dapat dilihat pada Tabel 12 berikut ini:

Tabel 12 Deformasi Limit

<i>Inner Story Drift Limit</i>	<i>Performance Level</i>			
	<i>Immediate Occupancy</i>	<i>Damage Control</i>	<i>Life Safety</i>	<i>Structural Stability</i>
<i>Maximum Total Drift Ratio</i>	0,01	0,01 – 0,02	0,02	0,33 V_i/P_i
<i>Maximum Inelastic Drift Ratio</i>	0,005	0,005 – 0,015	No Limit	No Limit

Sumber : ATC-40, 1996

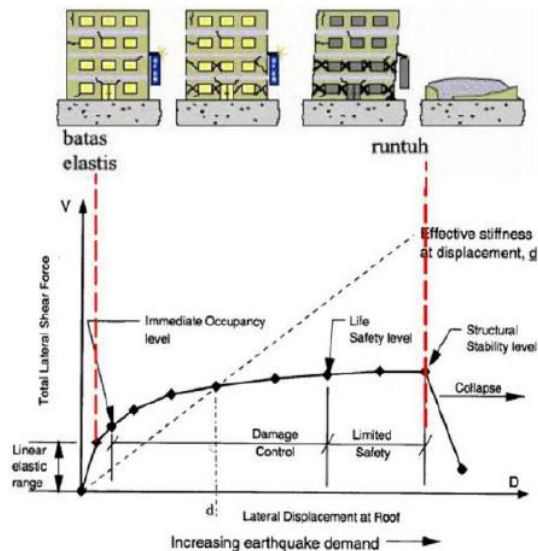
Pada Tabel 12 di atas dijelaskan bahwasanya nilai yang akan didapatkan pada kondisi maksimum *Drift* atau pada kondisi maksimum *in-elastic drift* dapat menjadi acuan kondisi bangunan.

Maximum inelastic drift ratio adalah proporsi simpangan total maksimum diluar titik leleh efektif sehingga dapat dikatakan bahwa *maximum inelastic drift ratio* merupakan nilai simpangan maksimum pada atap saat *performance point* dikurangi dengan *displacement* pada pelelehan pertama dibagi dengan tinggi total bangunan atau dengan persamaan berikut ini :

$$\text{Maximum Total Drift} = \frac{D_t}{H} \quad (47)$$

1.6.7.5 Level Kinerja Struktur Metode ATC-40

Sesuai dengan metode ATC-40 bahwasanya ada beberapa tingkatan kinerja struktur. Tingkat kinerja yang disebutkan menggambarkan akan kondisi dimana batas-batas kerusakan yang diperbolehkan pada bangunan ketika terjadi gempa. Batas-batas kondisi bangunan yang dimaksud menggambarkan kerusakan fisik dari bangunan , ancaman keselamatan yang dapat terjadi pada penghuni bangunan, dan penanganan terhadap bangunan pada kondisi pasca terjadi gempa. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 12 berikut ini:



Gambar 12 Ilustrasi Keruntuhan Gedung

Sumber : ATC-40, 1996 (Abdillah, 2024)

Pada gambar ilustrasi keruntuhan bangunan di atas, terlihat pada garis kurva terdapat simbol (♦) yang merupakan titik-titik dari level kinerja struktur. Kinerja yang ditujukan pada titik-titik tersebut seperti titik dimana terjadi pelelehan pertama pada salah satu elemen struktur atau kerusakan tertentu yang terjadi pada struktur contohnya seperti pecah atau terkelupasnya selimut beton pada kolom, atau terjadinya geser pada sendel hingga kerusakan total pada sistem.

Penentuan *performance point* telah diketahui kurva kapasitas suatu struktur terhadap beban yang terjadi di dalamnya. Level kinerja yang terjadi dapat dideskripsikan lagi sesuai dengan bagaimana kondisi bangunan setelah terjadi gempa. Untuk kategori level kinerja bangunan, dapat di lihat pada Tabel 13 dan Tabel 14 berikut ini :

Tabel 13 Kondisi Bangunan Setelah Terjadi Gempa dan Kategori Bangunan pada Tingkat Kinerja Struktur

Tingkat Kinerja	Kondisi Bangunan Pasca Gempa	Kategori Bangunan
SP-1 <i>Immediate Occupancy (IO)</i>	Bangunan aman saat terjadi gempa, risiko korban jiwa dan kegagalan struktur tidak terlalu berarti, gedung tidak mengalami kerusakan berarti, dan dapat segera difungsikan	Struktur bangunan yang mutlak difungsikan sebagai sarana penyelamatan, penyimpanan barang berbahaya, atau struktur bangunan ekonomi nasional. Contohnya rumah sakit, gedung bahan bakar atau bahan berbahaya.

Tabel 14 Kondisi Bangunan Setelah Terjadi Gempa dan Kategori Bangunan pada Tingkat Kinerja Struktur (Lanjutan)

Tingkat Kinerja	Kondisi Bangunan Pasca Gempa	Kategori Bangunan
SP-2 <i>Damage Control (DC)</i>	Merupakan transisi antara SP-1 dan SP-3. Bangunan masih mampu menahan gempa yang terjadi, risiko korban jiwa manusia sangat sedikit.	Struktur untuk bangunan bersejarah, bangunan yang menjadi tempat penyimpanan barang-barang berharga.
SP-3 <i>Life Safety (LS)</i>	Bangunan mengalami kerusakan tetapi tidak diperkenankan mengalami keruntuhan yang menyebabkan korban jiwa manusia (risiko korban jiwa sangat rendah). Setelah terjadi gempa maka bangunan dapat berfungsi kembali setelah dilakukan perbaikan komponen struktur maupun non-struktural.	Fasilitas-fasilitas umum, gedung perkantoran, perumahan, gedung dan lain sebagainya.
SP-4 <i>Limited Safety</i>	Merupakan transisi antara SP-3 dan SP-4 dan bukan merupakan tingkat serta tidak memperhitungkan aspek ekonomi dalam melakukan perbaikan pasca gempa.	-
SP-5 <i>Structural Stability (SS)</i>	Struktur pasca gempa mengalami kerusakan sehingga diambang keruntuhan total maupun parsial. Komponen struktur penahan beban gravitasi masih bekerja meskipun keseluruhan kestabilan sudah diambang keruntuhan.	-
SP-6 <i>Not Considered</i>	Bukan merupakan tingkat kinerja struktur, tetapi karya untuk melakukan evaluasi seismik non-struktur atau <i>retrofit</i> .	-

Sumber : ATC-40, 1996 (Abdillah, 2024)

1.7 Peneliti Terdahulu

Faradhilla dan Mentari, (2024) melakukan penelitian pada gedung eksisting di Jakarta Barat menggunakan analisis statik nonlinier dimana penelitian ini menghasilkan tingkat kinerja struktur gedung yang diperoleh berdasarkan *performance level* pada ATC 40. Tingkat kinerja struktur bangunan yang diperoleh adalah *Damage Control* (DC) dengan nilai maksimum *total drift* yang lebih besar dari 0,01 dan maksimum *inelastik drift* yang lebih besar dari 0,005. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa metode ini relevan untuk mengevaluasi kinerja seismik gedung di wilayah rawan gempa, sebagai upaya memastikan keselamatan struktur terhadap beban gempa.

Pattiwael et al., (2024) juga melakukan penelitian dengan menganalisis kinerja struktur gedung bertingkat dengan menggunakan metode *static non-linear* dengan bantuan *software* SAP2000 v.22. Dari penelitian ini diperoleh hasil yaitu nilai *displacement* antarlantai akibat beban gempa arah X terbesar yaitu 21.19 mm, dan arah Y perpindahan terbesar yaitu 20.73 mm. Evaluasi kinerja struktur hasil dari kurva kapasitas tinjauan arah X dan arah Y menunjukkan gedung termasuk dalam kondisi *Immediately Occupancy* (IO), ini menunjukkan bahwa gedung mengalami kerusakan yang kecil atau tidak berarti pada struktur, kekakuan struktur hampir sama pada saat belum terjadi gempa.

Memperluas fokus pada geometri elemen, **Dewi et al., (2024)** melalui penelitiannya yang membandingkan kinerja struktur kolom bulat dan kolom persegi terhadap beban gempa pada Gedung Balai Diklat Keuangan Denpasar menggunakan analisis pushover nonlinier melalui SAP2000. Hasil penelitian ini menemukan bahwa bentuk penampang kolom berperan signifikan terhadap kekakuan lateral, daktilitas, dan pola pembentukan sendi plastis saat struktur menerima beban gempa, sehingga pemilihan bentuk kolom dapat memengaruhi respons keseluruhan struktur.

Sutama A. et al., (2024) juga melakukan penelitian yang bertujuan untuk menganalisis perilaku struktur secara komparatif pada bangunan beton bertulang dengan variasi geometri kolom persegi dan kolom silinder. Objek penelitian adalah bangunan pendidikan 6 lantai dengan dimensi 35,1 x 23,4 meter dan tinggi total 24,2 meter. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan gaya dalam antara kedua jenis kolom relatif kecil (1–2%). Kolom silinder menunjukkan kapasitas yang lebih tinggi dalam menahan beban aksial (5098,01-7609,09 kN) dan momen (295–520 kNm) dibandingkan dengan kolom persegi. Meskipun kolom silinder menunjukkan nilai *drift* yang sedikit lebih besar, kedua jenis kolom tetap memenuhi batas simpangan yang ditetapkan dengan margin keamanan yang baik. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kedua geometri kolom memiliki kinerja struktur yang baik dan dapat digunakan secara bergantian dalam perencanaan struktur, dengan kolom silinder memiliki keunggulan dalam kapasitas penampang namun disertai dengan nilai drift yang sedikit lebih besar.

Sun et al., (2025) juga melalui penelitiannya yaitu bahwa penggunaan sengkang spiral pada kolom beton persegi mampu meningkatkan kinerja seismik dibandingkan sengkang konvensional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan sengkang spiral komposit mampu meningkatkan kapasitas geser, daktilitas, serta disipasi energi secara signifikan akibat efek pengekanan yang lebih efektif. Selain itu, pada penelitian ini parameter seperti rasio beban aksial, jarak antar sengkang, dan rasio diameter spiral terbukti sangat memengaruhi kinerja struktur, di mana konfigurasi yang optimal mampu menghasilkan kekuatan dan daktilitas maksimum. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kelemahan kolom persegi dalam hal kinerja seismik dapat diminimalkan melalui

modifikasi konfigurasi tulangan, sehingga performanya dapat ditingkatkan dan mendekati karakteristik kolom silinder yang secara alami memiliki efektivitas pengekanan yang lebih baik.

Zhao et al., (2026) melalui penelitiannya yang berfokus dalam mengkaji perbandingan kinerja seismik kolom berpenampang lingkaran dan persegi yang diisi beton mutu ultra tinggi (*Ultra-High Performance Concrete/UHPC*) di bawah pembebanan siklik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kolom berpenampang lingkaran memiliki perilaku histeretik yang lebih stabil, kapasitas deformasi yang lebih tinggi, serta kemampuan disipasi energi yang lebih baik dibandingkan kolom persegi. Sementara itu, kolom persegi cenderung mengalami konsentrasi tegangan pada sudut penampang yang berdampak pada penurunan daktilitas dan percepatan kerusakan lokal. Temuan ini mengindikasikan bahwa bentuk penampang kolom memiliki pengaruh terhadap respons seismik elemen struktur, khususnya dalam aspek daktilitas dan mekanisme keruntuhan. Oleh karena itu, penelitian ini relevan sebagai acuan dalam membandingkan kinerja kolom silinder dan kolom persegi pada struktur bangunan menggunakan pendekatan analisis nonlinier seperti pushover.

Tabel 15 Ringkasan Penelitian Terdahulu

Peneliti (Tahun)	Judul & Fokus Penelitian	Metode Analisis	Hasil Utama	Keterbatasan (Research Gap)
Faradhilla dan Mentari, (2024)	Evaluation of the Seismic Performance of The X Building Structure in West Jakarta Using Nonlinear Pushover Static Analysis	Analisis Pushover Statik Nonlinier melalui ETABS	Tingkat kinerja struktur berada pada kategori Damage Control sehingga struktur mampu menahan gempa dengan risiko cedera minimal.	Studi kasus yang dilakukan dengan bantuan ETABS hanya pada satu gedung dan belum menilai pengaruh variasi bentuk kolom atau detail tulangan spiral.
Pattiwael et al., (2024)	Analisis Kinerja Struktur Gedung Bertingkat Dengan Menggunakan Metode <i>Static Non-Linear</i> (Studi Kasus : Gedung Dprd Kabupaten Maluku Tengah)	Analisis Pushover Statik Nonlinier melalui SAP2000	Diperoleh <i>displacement</i> antarlantai akibat beban gempa arah arah X terbesar yaitu 21.19 mm, dan arah Y perpindahan terbesar yaitu 20.73 mm. Evaluasi kinerja struktur Hasil Dari kurva kapasitas Tinjauan arah X dan arah Y menunjukan gedung termasuk dalam kondisi <i>Immediate Occupancy</i>	Studi kasus yang dilakukan dengan bantuan SAP2000 hanya pada satu gedung dan belum menilai pengaruh variasi bentuk kolom atau detail tulangan spiral.
Dewi et al., (2024)	Perbandingan kinerja kolom bulat dan kolom persegi beton bertulang terhadap beban gempa.	Analisis Pushover Nonlinier melalui SAP2000	Bentuk penampang kolom memengaruhi kekakuan lateral, daktilitas, dan pola pembentukan sendi plastis.	Hanya membandingkan dua bentuk kolom serta variasi dimensi kolom belum dianalisis.

Tabel 16 Ringkasan Penelitian Terdahulu (Lanjutan)

Peneliti (Tahun)	Judul & Fokus Penelitian	Metode Analisis	Hasil Utama	Keterbatasan (Research Gap)
Sutama A. et al., (2025)	Studi Komparatif Perilaku Struktur Gedung Beton Bertulang Dengan Variasi Geometri Kolom Persegi Dan Kolom Bulat	Analisis Pushover Statik Nonlinier melalui ETABS	Penelitian ini menyimpulkan bahwa kedua geometri kolom memiliki kinerja struktur yang baik dan dapat digunakan secara bergantian dalam perencanaan struktur, dengan kolom silinder memiliki keunggulan dalam kapasitas penampang namun disertai dengan nilai drift yang sedikit lebih besar.	Penelitian yang dilakukan dengan bantuan ETABS belum mengevaluasi tingkat kinerja struktur berbasis PBD pada variasi geometri penampang kolom.
Sun et al., (2025)	Seismic Performance of Concrete Square Column Confined by Five-Spiral Composite Stirrups	Analisis numerik berbasis elemen hingga dengan bantuan ABAQUS	Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan sengkang spiral komposit mampu meningkatkan kapasitas geser, daktilitas, serta disipasi energi secara signifikan akibat efek pengekangan yang lebih efektif.	Penelitian yang dilakukan dengan bantuan ABAQUS hanya berfokus pada detail tulangan dengan bentuk penampang persegi tanpa meninjau pada bentuk penampang silinder
Zhao et al., (2026)	Seismic Performance of Circular and Square UHPC-Filled Columns	Analisis numerik berbasis elemen hingga dengan bantuan ABAQUS	Hasil penelitian menunjukkan bahwa kolom silinder memiliki perilaku histeretik yang lebih stabil, kapasitas deformasi yang lebih tinggi, serta kemampuan disipasi energi yang lebih baik dibandingkan kolom persegi	Penelitian yang dilakukan dengan bantuan ABAQUS hanya berfokus pada kolom tunggal dengan analisis nonlinier melalui pembebanan siklik.

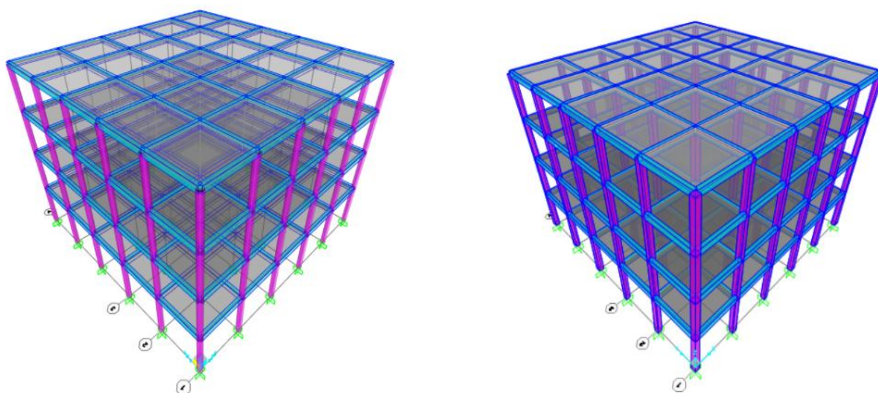
BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif dengan menggunakan analisis numerik berbasis simulasi komputasional. Pendekatan ini dipilih karena fokus utama penelitian ini adalah mengevaluasi dan membandingkan kinerja seismik antara struktur bangunan berpenampang kolom bulat dan struktur bangunan berpenampang kolom persegi. Proses tersebut dilaksanakan melalui perhitungan matematis dan pemodelan melalui *Software* SAP2000 guna menilai berbagai parameter kinerja struktural. Data yang dihasilkan berupa nilai-nilai numerik dan hasil tersebut dievaluasi berdasarkan standar ATC-40, kemudian diinterpretasikan untuk memperoleh kesimpulan yang menggambarkan respons struktur terhadap beban gempa.

2.2 Objek Penelitian

Objek yang dikaji berupa model numerik bangunan beton bertulang berlantai 4 dengan panjang 15 meter, lebar 15 meter dan tinggi 12 meter serta menggunakan dua tipe penampang kolom yaitu kolom bulat dan kolom persegi. Kedua bangunan diasumsikan berada di Kota Palu dengan kondisi tanah termasuk dalam kelas situs SD (tanah sedang) dengan sistem struktur yang digunakan adalah sistem Struktur Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) yang dapat dilihat pada Gambar 13. Proses pemodelan, analisis, dan evaluasi kinerja seismik dilakukan dengan bantuan *software* SAP2000, yang berbasis pada metode elemen hingga (*Finite Element Method*) guna memperoleh hasil yang akurat dan terukur. Analisis kinerja struktur terhadap beban gempa dilakukan dengan metode Analisis *Pushover* Statik Nonlinier (*Nonlinear Static Pushover Analysis*), yaitu suatu pendekatan nonlinier yang bertujuan untuk mengidentifikasi respons struktur hingga mencapai kondisi inelastis serta menilai level kinerja dari struktur bangunan.



Gambar 13 Bangunan dengan kondisi, (a) Berpenampang kolom bulat, (b) Berpenampang kolom persegi

Sumber : Penulis, SAP2000

2.3 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.

2.4 Metode Pengambilan Data

Pengambilan data dalam penelitian ini menggunakan metode Studi Literatur dan Data Sekunder (Studi Kasus).

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* statik nonlinier, rekayasa gempa, dan standar desain beton bertulang seperti SNI 1726 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa dan SNI 2847 mengenai perencanaan struktur beton. Selain itu, penelitian ini juga merujuk pada pedoman evaluasi kinerja struktur tahan gempa internasional, yakni ATC-40 (*Applied Technology Council*), sebagai acuan dalam menilai kinerja seismik dan tingkat keamanan struktur secara komprehensif.

2.4.2 Data Sekunder (Studi Kasus)

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 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 dari material yang digunakan yaitu mutu beton (f'_c) dan baja tulangan (f_y) serta (f_u). Parameter lain yang digunakan adalah pola pembebanan (U) berupa beban mati, beban hidup dan pembebanan lateral yang diterapkan selama pengujian eksperimental, yang kemudian disimulasikan sebagai beban gravitasi dan beban dorong statik dalam proses analisis *pushover*. Dalam penelitian ini, penulis tidak mengambil hasil pengujian eksperimental secara langsung di laboratorium sebagai acuan, 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 Metode Analisis Data

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

2.5.1 Analisis Perbandingan Kurva Kapasitas

Tahapan ini dilakukan dengan membandingkan kurva kapasitas, yaitu hubungan antara gaya geser dasar (V) dan *displacement* (D) pada kolom eksisting dengan metode ATC-40 untuk menilai level kinerja dari struktur.

2.5.2 Penentuan Titik Kinerja (Performance Point)

Penentuan Titik Kinerja dilakukan dengan metode metode spektrum kapasitas (ATC-40). Metode ini membandingkan Kurva Kapasitas struktur yang dimodifikasi menjadi Spektrum Kapasitas dengan Spektrum Permintaan Gempa (*Demand Spectrum*). Titik perpotongan kedua kurva ini didefinisikan sebagai Titik Kinerja, yang memberikan nilai percepatan spektral (S_a) dan perpindahan spektral (S_d) maksimum yang terjadi.

2.5.3 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 ATC-40, penilaian dilakukan menggunakan kriteria rasio drift inelastis atau kondisi sendi plastis, yang mengklasifikasikan kinerja struktur ke dalam beberapa level, yaitu *Immediate Occupancy* (IO), *Damage Control* (DC), *Life Safety* (LS), atau level lain yang sesuai.

2.6 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui serangkaian langkah yang terstruktur dan sistematis, dengan fokus utama pada proses pemodelan serta analisis numerik melalui *software* SAP2000. Secara garis besar, tahapan penelitian evaluasi bangunan yang menggunakan dua jenis kolom terdiri dari pengumpulan data dan studi literatur, pemodelan dan analisa hasil penelitian, serta kesimpulan.

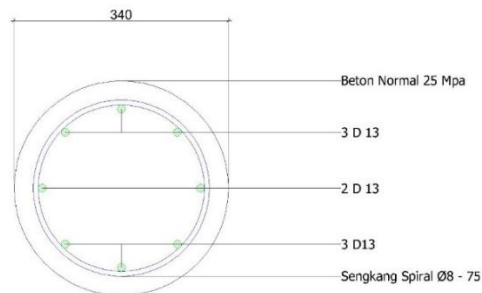
2.6.1 Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini, digunakan data sekunder yang diperoleh dari eksperimen penelitian tingkat Doktor (S3) yang dilaksanakan di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Data sekunder yang dimaksud adalah data berupa dimensi, material, dan jenis kolom yang dapat dilihat pada Gambar 14 Gambar 15 dengan uraian sebagai berikut :

- Kolom Bulat
 - Kuat tekan beton (f_c') : 25 Mpa
 - Seilmut Beton : 40 mm
 - Diamter : 340 mm
 - Berat Volume Beton : 24 kN/m³
 - Berat Volume Baja : 78,5 kN/m³
 - Modulus Elastisitas (E) Baja : 23500 Mpa
 - Modulus Elastisitas (E) Beton : 200000 Mpa
 - Mutu Baja
 - Tulangan Longitudinal BJTS 420A - 8 D13 dengan $F_y = 420$ Mpa dan $F_u = 525$ Mpa

- Tulangan Transversal (spiral) BJTP 280 $\varnothing 8 - 75$ dengan $F_y = 280$ Mpa dan $F_u = 350$ Mpa

Untuk detail kolom bulat dapat dilihat pada gambar berikut ini:

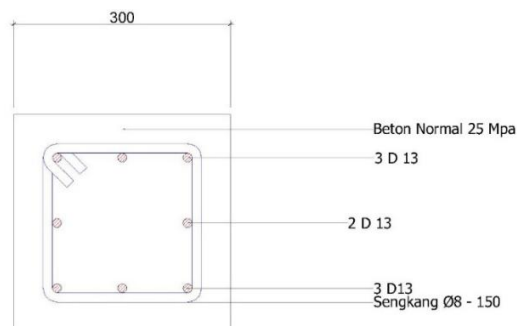


Gambar 14 Detail Kolom Bulat

Sumber : Penulis, Gambar Disertasi

- Kolom Persegi
 - Kuat tekan beton (f_c') : 25 Mpa
 - Seilmut Beton : 40 mm
 - Dimensi : 300 x 300 mm
 - Berat Volume Beton : 24 kN/m³
 - Berat Volume Baja : 78,5 kN/m³
 - Modulus Elastisitas (E) Baja : 23500 Mpa
 - Modulus Elastisitas (E) Beton : 200000 Mpa
 - Mutu Baja
 - Tulangan Longitudinal BJTS 420A - 8 D13 dengan $F_y = 420$ Mpa dan $F_u = 525$ Mpa
 - Tulangan Transversal (spiral) BJTP 280 $\varnothing 8 - 75$ dengan $F_y = 280$ Mpa dan $F_u = 350$ Mpa

Untuk detail kolom bulat dapat dilihat pada gambar berikut ini:



Gambar 15 Detail Kolom Persegi

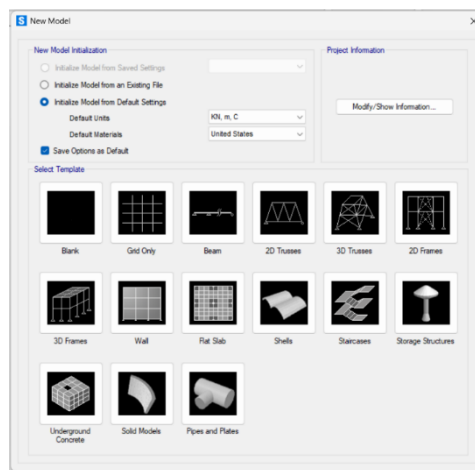
Sumber : Penulis, Gambar Disertasi

2.6.2 Pemodelan Struktur

2.6.2.1 Pemodelan Baru (*New Model*)

Pada awal pembuatan desain bangunan yang dibuat, maka yang pertama yang harus dilakukan adalah memodelkan bentuk bangunan terlebih dahulu. Pada tahap awal pemodelan ini dilakukan saat awal pembukaan aplikasi atau juga dapat dilakukan dengan menekan perintah *New Model* atau dengan menekan perintah di *keyboard* yaitu *Control-N*.

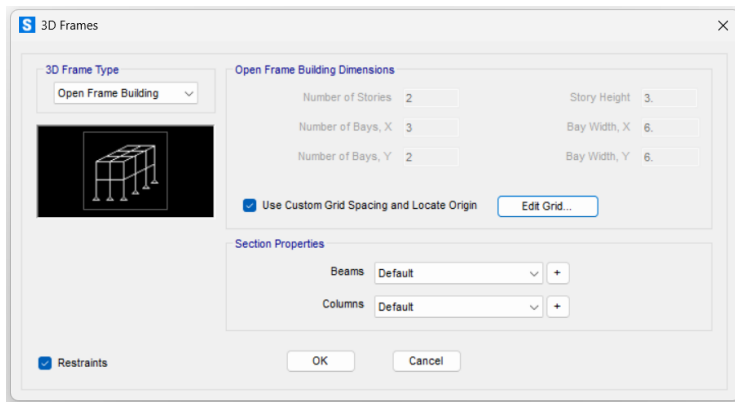
Setelah melakukan perintah *new model* akan muncul *New Model Initialization*, pada *windows* tersebut ubah satuan terlebih dahulu menjadi KN,m,C kemudian pada bagian *Select Template* pilih *3D Frames* untuk menampilkan bangunan tiga dimensi. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 16 di bawah ini.



Gambar 16 Pemodelan awal 3D bangunan

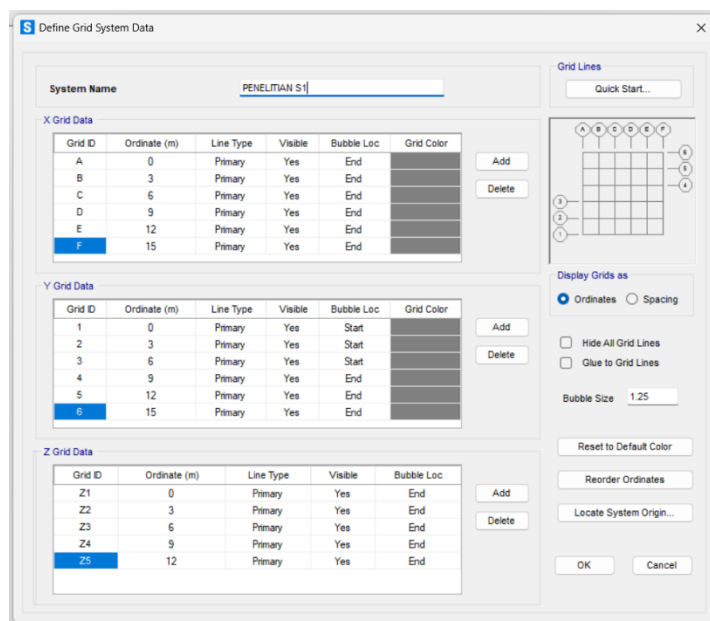
Sumber : Penulis, SAP2000

Setelah dilakukan pengaturan seperti gambar di atas, kemudian akan beralih ke pengaturan selanjutnya yaitu *3D Frame Type*. Pada pengaturan ini akan membuat bangunan yang akan kita bangun, dengan menentukan jarak pada setiap *grid line x*, dan juga jarak setiap *grid line y* begitu pun dengan pengaturan jumlah tinggi tiap lantai bangunan pada bagian *Open Frame Building Dimensions*. Bangunan yang digunakan dalam penelitian ini adalah bangunan yang simetris, dengan panjang dan lebar 15 meter dengan ketinggian 12 meter, oleh karena itu cara menentukan jarak sesuai dengan bangunan yang diteliti dengan memilih *Custom Grid Spacing* dan klik *Edit Grid Data* untuk menentukan ukuran *grid* bangunan arah x dan y, begitupun dengan jumlah dan tinggi tingkat arah z, kemudian akan tampil menu *Define Grid System Data* lalu isi sesuai dengan dimensi yang dibutuhkan lalu klik *Ok*. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 17 dan Gambar 18 di bawah ini.



Gambar 17 3D Frame Type

Sumber : Penulis, SAP2000



Gambar 18 Permodelan grid pada bangunan gedung

Sumber : Penulis, SAP2000

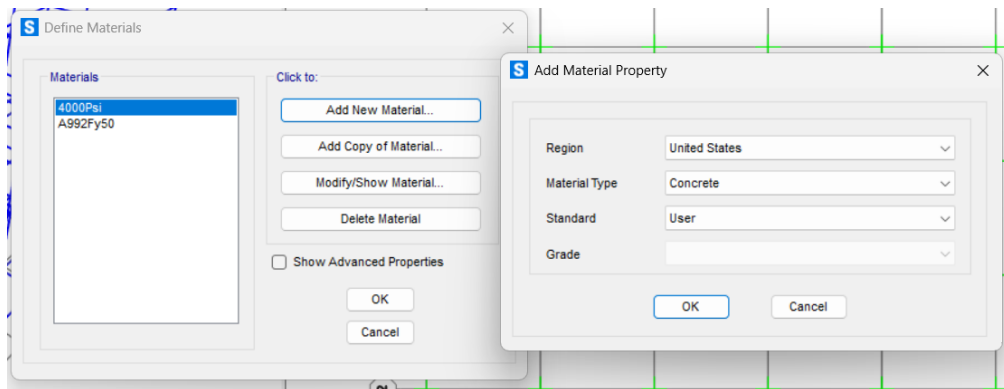
2.6.2.2 Definisi Material

Pada tahap pendefinisian material ini dimaksudkan untuk menentukan jenis material yang digunakan dalam pembangunan bangunan pada penelitian ini. Bangunan yang kita teliti ini berupa bangunan dengan material struktur beton bertulang.

1. Beton

Klik menu *Define > Materials Properties > Add New Materials*. Selanjutnya akan tampil menu *Add Material Property*. Kemudian Isi spesifikasi material beton yang akan

digunakan sesuai dengan apa yang telah di tentukan pada menu *Material Property Data* kemudian klik *Ok*, seperti pada Gambar 19 dan Gambar 20 berikut



Gambar 19 Define material property beton

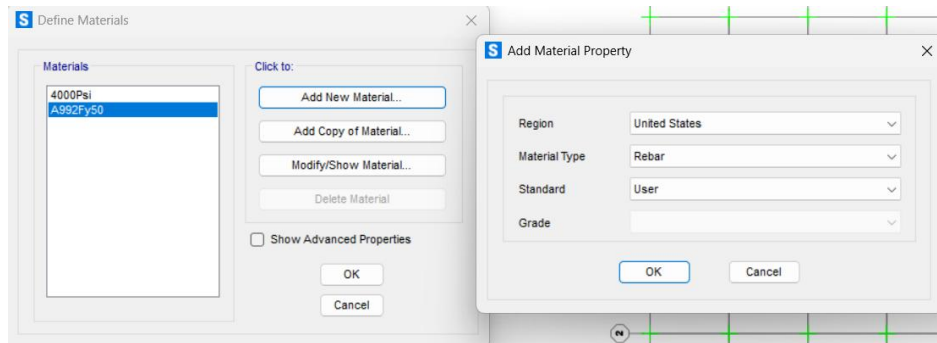
Sumber : Penulis, SAP2000

Gambar 20 Spesifikasi material beton

Sumber : Penulis, SAP2000

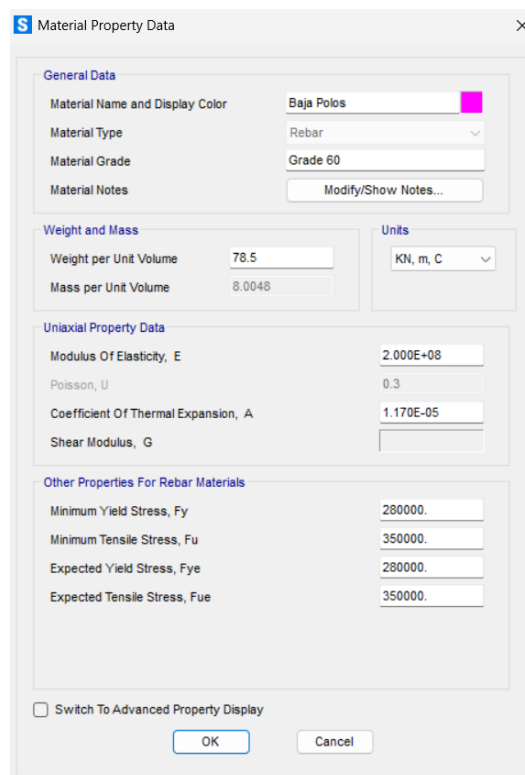
2. Baja

Dengan cara yang sama seperti input pada material beton, klik menu *Define > Materials properties > Add New Materials*. Isi spesifikasi material baja yang digunakan sesuai dengan apa yang telah di tentukan seperti pada Gambar 21, Gambar 22, Gambar 23 dan Gambar 24 berikut.



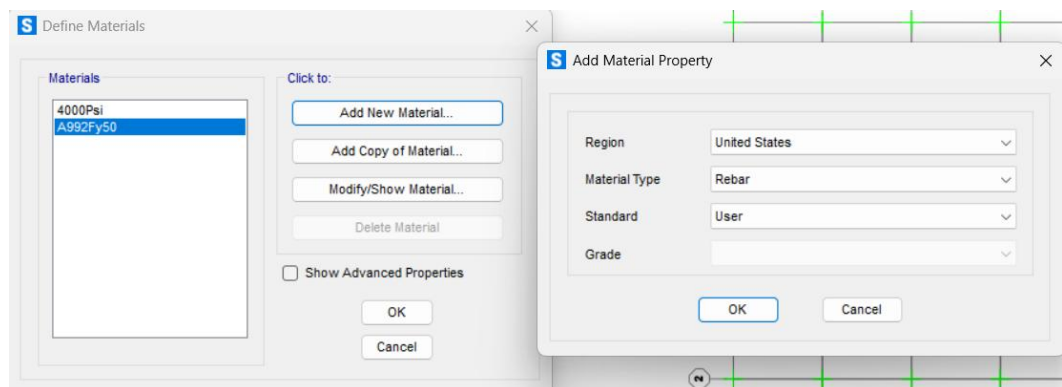
Gambar 21 Define material property baja tulangan polos

Sumber : Penulis, SAP2000



Gambar 22 Spesifikasi material baja tulangan BJTP 280

Sumber : Penulis, SAP2000



Gambar 23 Define material property baja tulangan ulir

Sumber : Penulis, SAP2000

Gambar 24 Spesifikasi material baja tulangan BJTS 420A

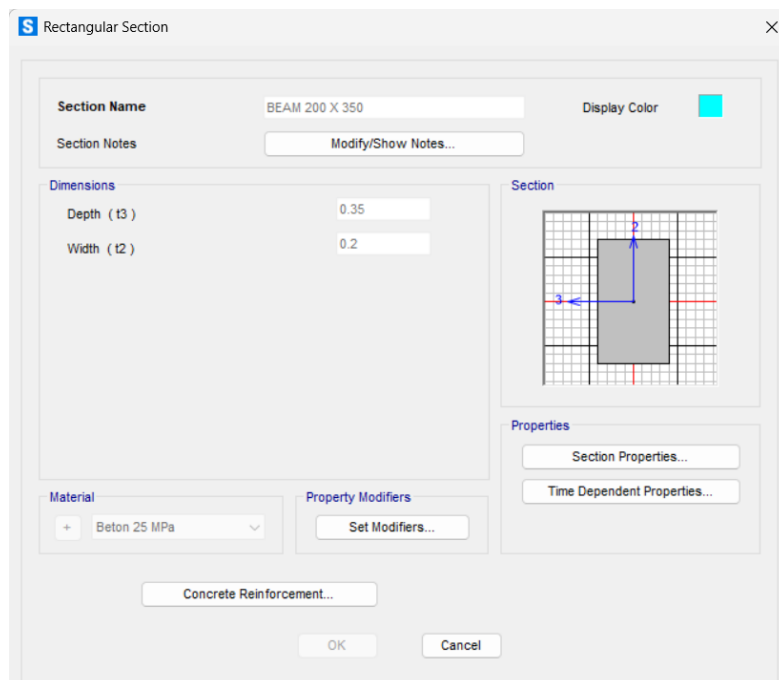
Sumber : Penulis, SAP2000

2.6.2.3 Definisi Struktur Bangunan

Pendefinisian struktur bangunan ini dapat dilakukan dengan memasukkan data dimensi dari struktur balok, kolom, pelat lantai, dan dinding ke dalam SAP2000 sesuai dengan data dimensi struktur bangunan yang telah dimiliki. Pada penelitian ini dimensi kolom yang digunakan terbagi menjadi dua jenis yaitu kolom silinder dengan detail tulangan spiral dan kolom persegi dengan detail tulangan sengkang konsensional. Sementara dimensi untuk balok yang digunakan adalah sama pada setiap lantai dengan ukuran 200 x350 mm.

1. Definisi Struktur Balok

Pendefinisian struktur balok dilakukan dengan cara klik *Define > Section Properties > Frame Section* setelah muncul tampilan *Frame Properties* kemudian pilih *Add New Property*. Setelah memilih *Add New Property* akan muncul tampilan dari *Add Frame Section Property*, kemudian pada tampilan itu pada pilihan *Concrete* pilih *Rectangular Concrete*. Pada layer *Rectangular Section* masukkan data dimensi dan material yang digunakan. Untuk pendefinisian balok klik *Concrete Reinforcement* lalu ubah penggunaan tipe frame dari *Column* menjadi *Beam* dengan cara memilih *(Beam) M3 Design Only* pada *Design Type*. Setelah itu pada bagian *Reinforcement Overrides for Ductile Beams* masukkan luas tulangan terpakai pada masing-masing daerah tumpuan. Untuk lebih jelasnya dapat di lihat pada Gambar 25 dan Gambar 26 berikut.



Gambar 25 Pendefinisian *frame section* balok

Sumber : Penulis, SAP2000

Rebar Material	
Longitudinal Bars	Baja Ulir
Confinement Bars (Ties)	Baja Ulir

Design Type	
☐ Column (P-M2-M3 Design)	
☒ Beam (M3 Design Only)	

Concrete Cover to Longitudinal Rebar Center	
Top	0.04
Bottom	0.04

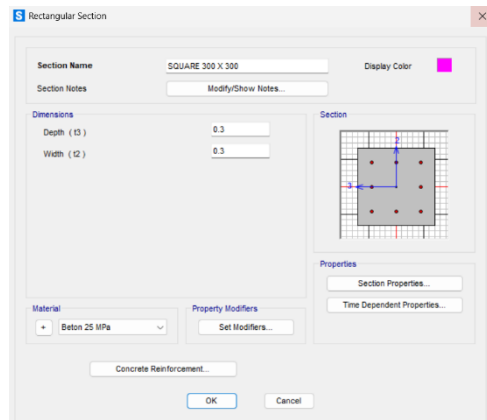
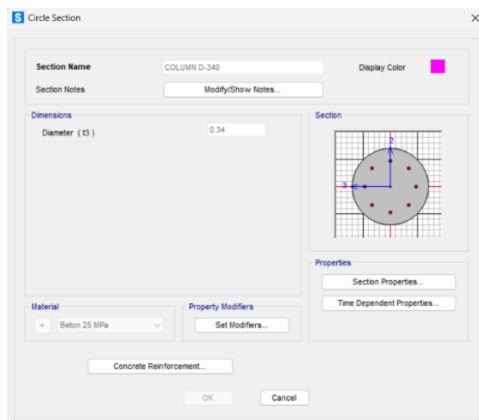
Reinforcement Overrides for Ductile Beams		
	Left	Right
Top	7.964E-04	7.964E-04
Bottom	7.964E-04	7.964E-04

Gambar 26 Pendefinisian material tulangan pada balok

Sumber : Penulis, SAP2000

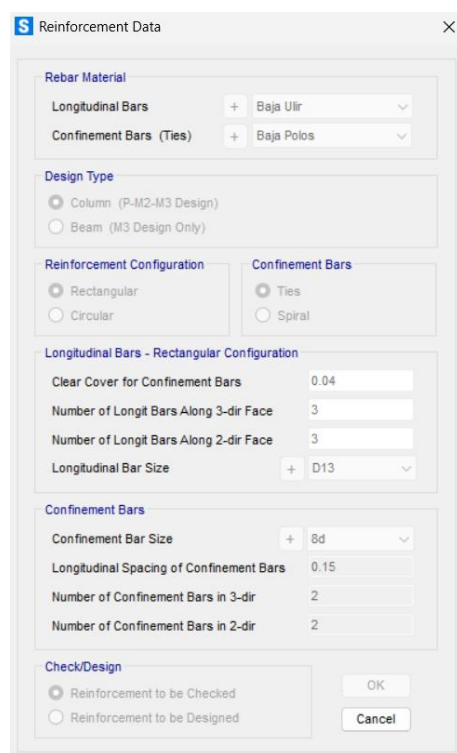
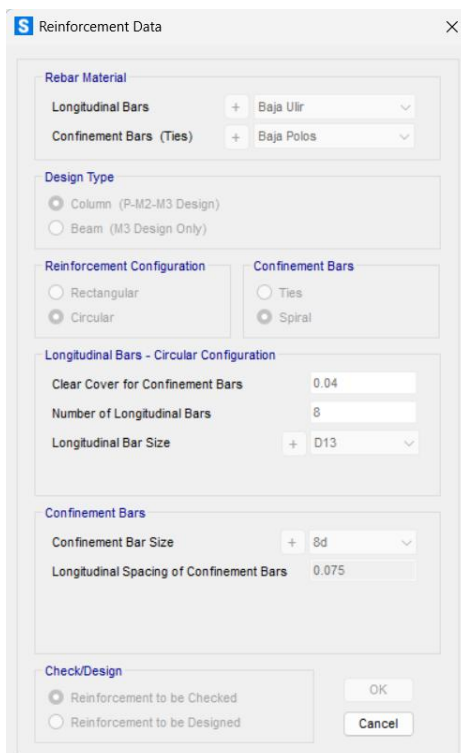
2. Definisi Struktur Kolom

Pendefinisian struktur kolom bulat maupun kolom persegi dilakukan dengan tahapan yang sama dengan pendefinisian pada struktur balok yaitu dengan cara klik *Define > Section Properties > Frame Section* setelah muncul tampilan *Frame Properties* kemudian pilih *Add New Property*. Setelah memilih *Add New Property* akan muncul tampilan dari *Add Frame Section Property*, kemudian pada tampilan itu pada pilihan *Concrete* pilih *Rectangular* (kolom persegi) dan/atau *Circular* (kolom bulat) *Concrete*. Pada layer *Rectangular/Circular Section* masukkan data dimensi dan material yang digunakan. Untuk pendefinisian kolom klik *Concrete Reinforcement* lalu ubah penggunaan tipe frame dari *Beam* menjadi *Column* dengan cara memilih *(Column) P-M2-M3 Design* pada *Design Type*. Setelah itu pada layer *Reinforcement Data* masukkan dan sesuaikan data yang digunakan dalam penelitian dengan memperhatikan detail penulangan, lalu pada menu *Check/Design* pilih *Reinforcement to be Checked*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 27 dan Gambar 28 berikut.



(a) (b)
Gambar 27 Pendefinisian *frame section*; (a) Kolom Bulat ; (b) Kolom Persegi

Sumber : Penulis, SAP2000



(a) (b)
Gambar 28 Pendefinisian material tulangan; (a) Kolom Bulat ; (b) Kolom Persegi

Sumber : Penulis, SAP2000

3. Definsi Pelat Lantai dan Pelat Atap

Pendefinisian pelat lantai dan pelat atap dilakukan dengan cara klik *Define > Section Properties > Area Sections* setelah muncul tampilan *Area Sections* kemudian pilih *Add New Property* dengan memilih *Shell* pada *Section Type* adalah *Shel*. Pada tampilan *Shell Section Data* isi data pelat lantai sesuai dengan yang telah ditentukan. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 29 berikut:

The image shows the 'Shell Section Data' dialog box. It has a title bar with an 'S' icon and a close button. The main area is divided into several sections: 'Section Name' with a text field containing 'PELAT LANTAI' and a 'Display Color' button; 'Section Notes' with a 'Modify/Show...' button; 'Type' with radio buttons for 'Shell - Thin' (selected), 'Shell - Thick', 'Plate - Thin', 'Plate Thick', 'Membrane', and 'Shell - Layered/Nonlinear', along with a 'Modify/Show Layer Definition...' button; 'Thickness' with input fields for 'Membrane' and 'Bending', both set to '0.12'; 'Material' with a 'Material Name' dropdown set to 'Beton 25 MPa' and a 'Material Angle' input set to '0'; 'Time Dependent Properties' with a 'Set Time Dependent Properties...' button; 'Concrete Shell Section Design Parameters' with a 'Modify/Show Shell Design Parameters...' button; 'Stiffness Modifiers' with a 'Set Modifiers...' button; and 'Temp Dependent Properties' with a 'Thermal Properties...' button. At the bottom are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Gambar 29 Pendefinisian Area Section sebagai pelat

Sumber : Penulis, SAP2000

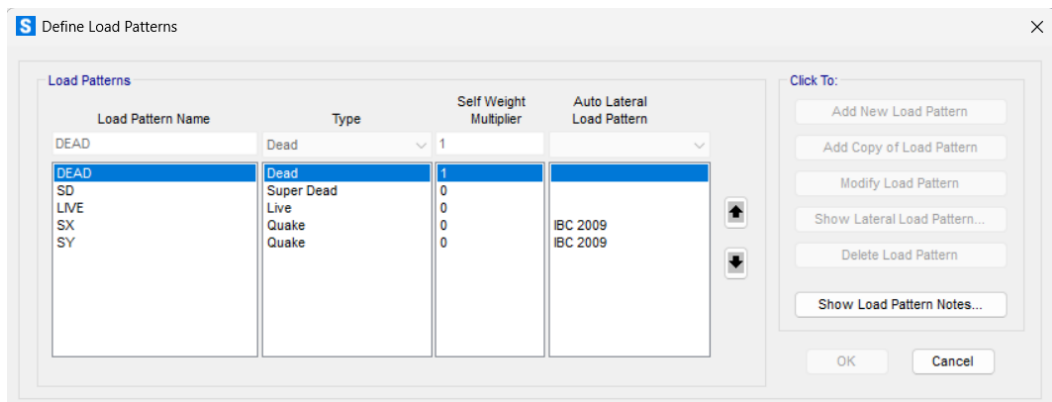
Lakukan cara yang sama untuk membuat semua pelat lantai dan pelat atap yang diperlukan untuk permodelan bangunan yang akan diteliti.

2.6.2.4 Definisi Pembebanan Bangunan

Pembebanan pada bangunan dilakukan untuk pengaplikasian beban pada struktur bangunan secara nyata untuk di analisis. Pembebanan yang akan diberikan pada bangunan yang menggunakan kolom silinder dan bangunan yang menggunakan kolom persegi yang akan di teliti berupa beban mati (*Dead Load*), beban mati tambahan (*SuperDead Load*), beban hidup (*Live Load*), dan beban lateral atau beban gempa. Pendefinisian pembebanan dapat dilihat melalui tahapan berikut.

1. Pendefinisian beban pada *Load Patterns*

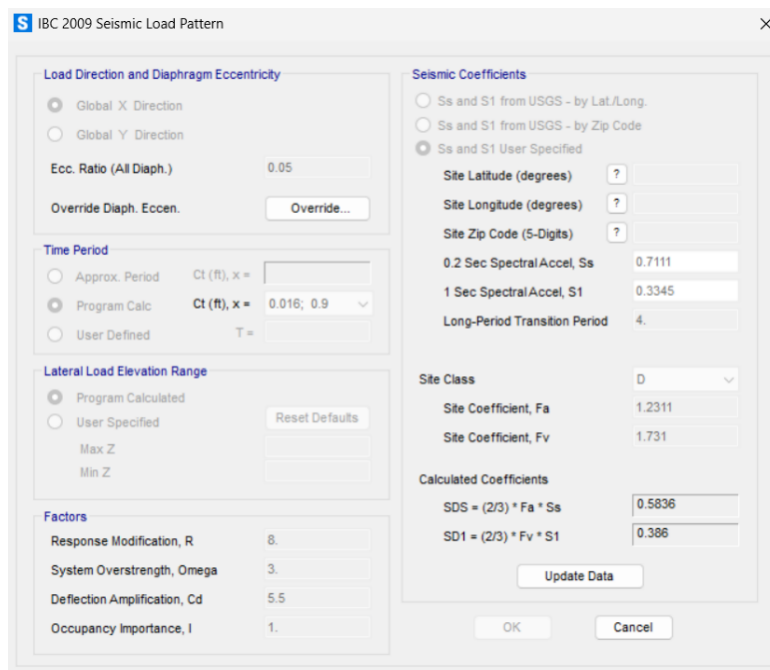
Pendefinisian pembebanan pada bangunan di *Load Patterns* dilakukan dengan cara klik *Define - Load patterns*. Setelah muncul tampilan *Define Load Patterns* kemudian isi data-data pembebanan yang dibutuhkan. Untuk contoh lebih jelasnya dapat dilihat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 30 berikut.



Gambar 30 Pembebanan Bangunan pada *Load Patterns*

Sumber : Penulis, SAP2000

Jika diperhatikan pada Gambar 30 di atas terdapat beban gempa arah x (Ex) dan beban arah y (Ey) memiliki *Auto Lateral Load* sendiri. Pada *Auto Lateral Load* gempa arah x dan gempa arah y digunakan IBC 2009 karena mengikuti peraturan yang berlaku di Indonesia yang telah disediakan oleh SAP2000. Pembebanan gempa ini harus dimodifikasi sesuai dengan data yang telah didapatkan. Untuk lebih jelas data yang dimasukkan pada pembebanan gempa arah x dan beban gempa arah y dapat dilihat pada Gambar 31 dan Gambar 32 berikut.



Gambar 31 *Modify Lateral Load* pada Pembebanan Gempa Arah X (Ex)

Sumber : Penulis, SAP2000

Gambar 32 Modify Lateral Load pada Pembebanan Gempa Arah Y (Ey)

Sumber : Penulis, SAP2000

2. Pendefinisian *Respons Spectrum*

Pendefinisian pembebanan bangunan pada *Respons Spectrum* dilakukan dengan cara klik *Define > Function > Response Spectrum*. Setelah muncul tampilan dari *Define Response Spectrum Function* pada pilihan *Choose Function Tipe to Add* pilih IBC 2009 lalu Klik *Add New Function*. Setelah memilih *Add New Function* kemudian masukkan nilai *Ss* dan *S1*, *Situs Class* serta *Long-Periode* sesuai dengan data yang telah didapatkan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 32 berikut ini.

Period	Acceleration
0	0.2335
0.1323	0.5836
0.6614	0.5836
0.8	0.4025
1	0.306
1.2	0.3217
1.4	0.2767
1.6	0.2413

Gambar 33 Penginputan Data Grafik *Respons Spectrum*

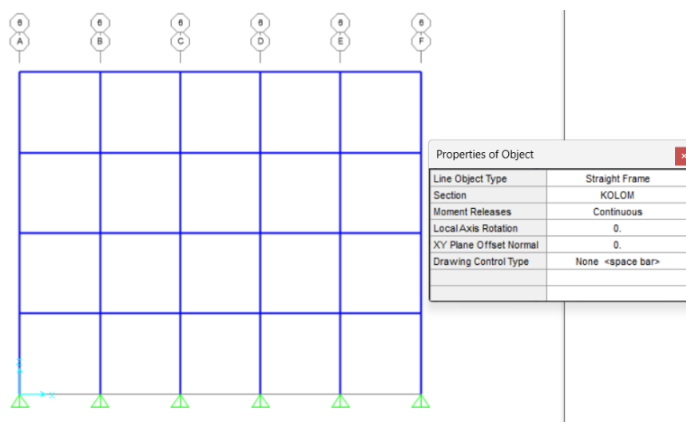
Sumber : Penulis, SAP2000

2.6.2.5 Permodelan Struktur Bangunan

Pembuatan model struktur bangunan yang dianalisis dilakukan setelah selesainya pendefinisian dari struktur balok, kolom, plat lantai dan juga dinding. Permodelan struktur bangunan dilakukan sesuai dengan gambar acuan permodelan bangunan.

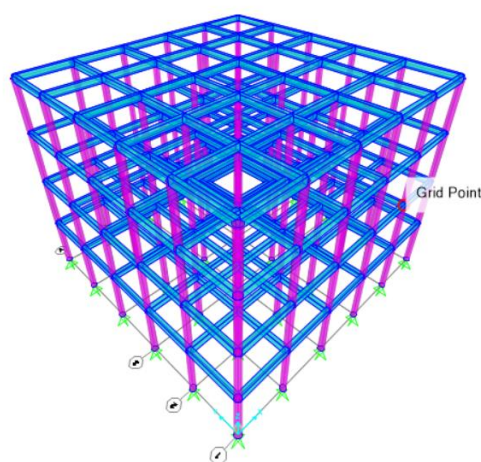
1. Permodelan Balok dan Kolom

Permodelan balok dan kolom dapat dilakukan dengan cara klik *Draw > Quick Draw Frame/Cable/Tendon >* kemudian pilih *tools* yang sesuai dengan keperluan permodelan yang akan dilakukan pada *Properties of Object*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 33 dan Gambar 34 berikut.



Gambar 34 Permodelan Balok Dan Kolom

Sumber : Penulis, SAP2000

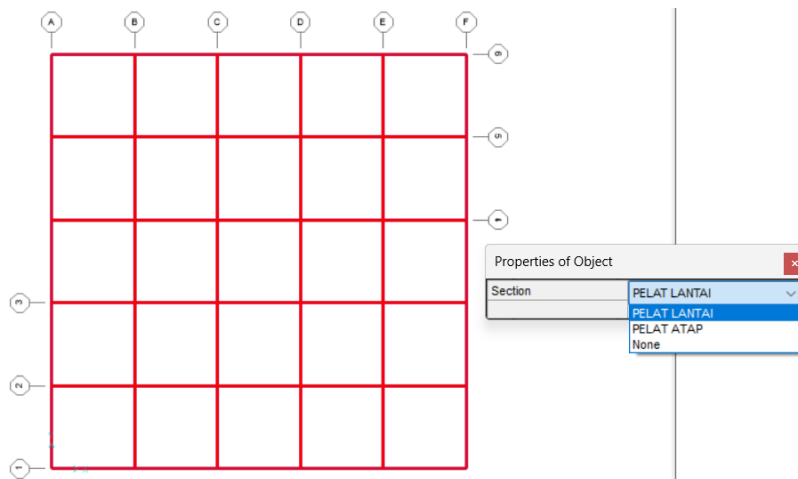


Gambar 35 Hasil Dari Permodelan Struktur Balok Dan Kolom

Sumber : Penulis, SAP2000

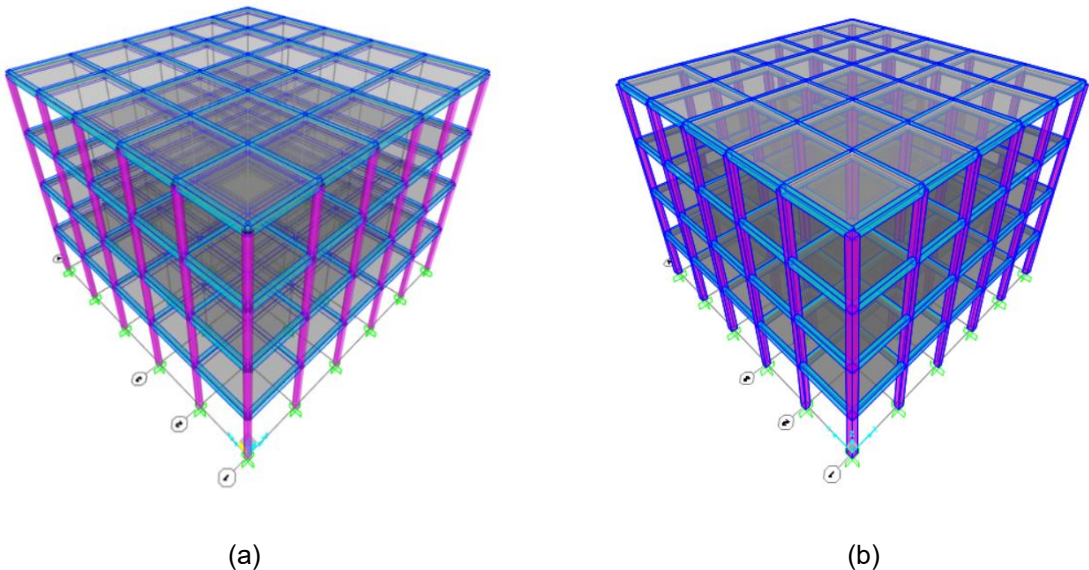
2. Permodelan pelat lantai dan pelat atap

Permodelan pelat lantai dan plat atap dapat dilakukan dengan cara menampilkan bangunan dalam arah xy pada tools SAP2000 lalu klik *Draw > Quick Draw Area >* kemudian pilih *tools* yang sesuai dengan keperluan permodelan yang akan dilakukan lalu *block* semua gambar. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 36 dan Gambar 37 berikut.



Gambar 36 Permodelan pelat lantai dan pelat atap

Sumber : Penulis, SAP2000

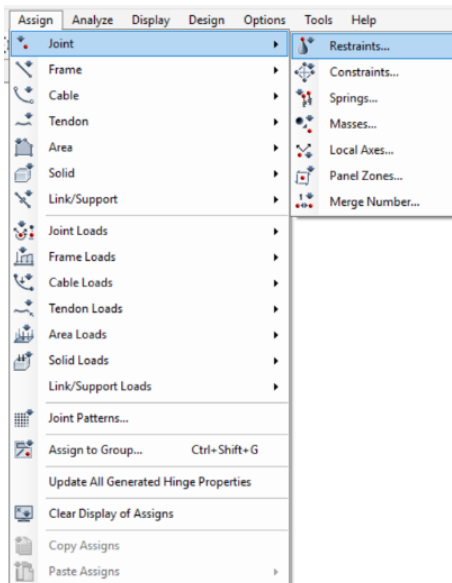


Gambar 37 Hasil dari permodelan pelat lantai dan pelat atap ; (a) Bangunan dengan Kolom Bulat ; (b) Bangunan dengan Kolom Persegi

Sumber : Penulis, SAP2000

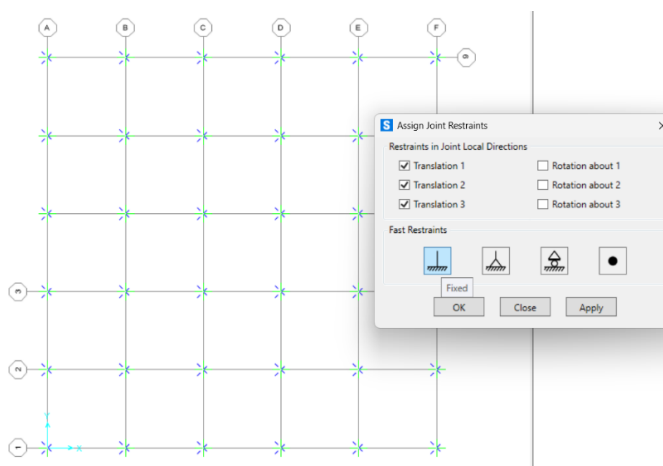
3. Menentukan *Joint Restraint*

Setelah semua permodelan struktur telah dilakukan maka selanjutnya adalah menentukan jenis dari *Joint Restraint* yang digunakan pada bangunan yang akan diteliti. Menentukan *joint Restrain* dilakukan dengan cara *Select* semua *joint* pada bagian paling bawah permodelan struktur kemudian klik *Assign – Joint – Restraints*. Setelah muncul tampilan *Joint Assignmet-Restraint* kemudian pilih per-lekatan jepit. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 38 dan Gambar 39 berikut.



Gambar 38 Cara Menentukan *Joint Restraints*

Sumber : Penulis, SAP2000



Gambar 39 Pilihan Dari *Joint Restraints*

Sumber : Penulis, SAP2000

2.6.3 Perhitungan Pembebanan

Pembahasan mengenai pembebanan terhadap bangunan atau gedung yang diteliti mengacu pada peraturan SNI 1727:2020 Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait Untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain sebagai revisi dari SNI 1727:2013 tentang Beban Minimum Untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain.

2.6.3.1 Pembebanan Beban Mati

Pembebanan pada beban mati sendiri yang ditimbulkan dari beban mati kolom, balok, dan pelat lantai telah secara otomatis dihitung oleh program SAP2000.

2.6.3.2 Pembebanan Beban Mati Tambahan

Perhitungan beban mati sendiri pada kolom, balok, dan pelat lantai adalah pembebanan beban mati tambahan yang akan ditambahkan pada beban struktur tersebut. Penambahan beban mati tambahan pada struktur dapat dilihat pada Tabel 17, Tabel 18 dan Tabel 19 berikut ini.

Tabel 17 Beban Mati Tambahan Pada Pelat Lantai

Keterangan	Komponen Gedung	Tebal (m)	Berat	Satuan
Beban Mati Tambahan pada Lantai	Pasir	0,01	0,16	kN/m ²
	Spesi	0,03	0,66	kN/m ²
	Keramik	0,01	0,22	kN/m ²
	Plafon dan penggantung	-	0,2	kN/m ²
	Instalasi ME	-	0,25	kN/m ²
Total			1,49	kN/m²

Sumber : Penulis

Tabel 18 Beban Mati Tambahan Pada Pelat Atap

Keterangan	Komponen Gedung	Tebal (m)	Berat	Satuan
Beban Mati Tambahan pada Atap	<i>Waterproofing</i> aspal	0,02	0,28	kN/m ²
	Plafon dan penggantung	-	0,2	kN/m ²
	Instalasi ME	-	0,25	kN/m ²
	Total		0,73	kN/m²

Sumber : Penulis

Tabel 19 Beban Mati Tambahan Pada Balok

Keterangan	Komponen Gedung	Tinggi (m)	Berat	Satuan
Beban Mati Tambahan pada Balok	Dinding pasangan bata ½ batu	2,65	6,625	kN/m ²
Total			6,625	kN/m²

Sumber : Penulis

Beban mati tambahan yang bekerja pada balok adalah beban dinding pasangan bata $\frac{1}{2}$ batu dengan asumsi bahwa beban yang bekerja hanya pada sisi tepi bangunan saja.

2.6.3.3 Pembebanan Beban Hidup

Pembebanan beban hidup pada struktur gedung yang memiliki sifat tidak tetap, sehingga beban yang bekerja pada lantai bangunan tergantung dari fungsi ruang yang digunakan, oleh karena itu pada SNI 1727 : 2020 tentang Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain menetapkan bahwa bangunan dengan fungsi sebagai gedung perkantoran Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 20 berikut:

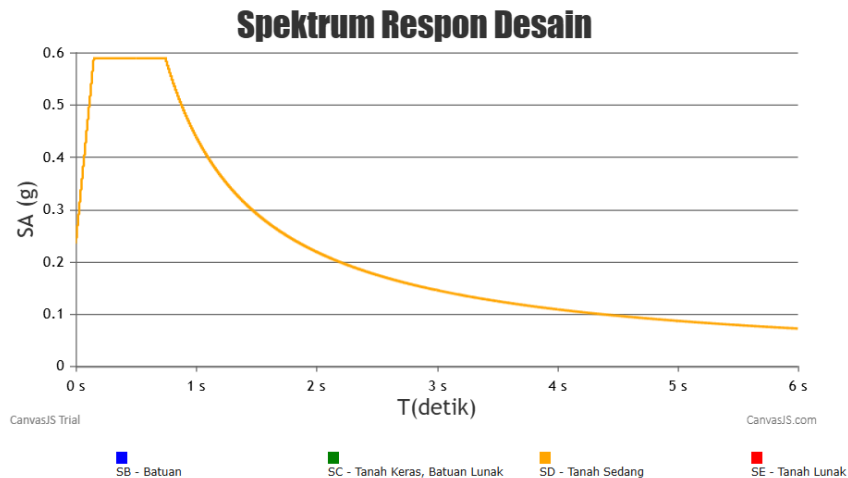
Tabel 20 Beban Hidup Untuk Gedung

No	Jenis Beban Hidup	Beban	Satuan
1	Lobi dan Koridor lantai pertama	4.79	kN/m ²
2	Kantor	2.40	kN/m ²
3	Koridor di atas lantai pertama	3.83	kN/m ²
4	Atap datar, berbubung, dan lengkung	0.96	kN/m ²
5	Atap bukan untuk hunian	0.96	kN/m ²

Sumber : SNI 1727 : 2020 tentang Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain

2.6.3.4 Pembebanan Beban Gempa

Bangunan gedung yang menjadi objek penelitian berlokasi di Kota Palu dengan jenis tanah di lokasi adalah tanah sedang (SD). Bangunan yang diteliti memiliki jumlah lantai sebanyak 4 lantai dengan total ketinggian 12 m. Analisis beban gempa pada bangunan ini menggunakan data Spektrum Percepatan Periode Pendek (S_s) dan Spektrum Percepatan Periode 1 Detik (S_1) sebagai acuan dalam perhitungan. Data tersebut diperoleh dari peta spektra. Pada peta tersebut telah tertera nilai percepatan periode pendek di setiap lokasi. Pada penelitian ini nilai Beban gempa yang dimasukkan dalam perhitungan diperoleh melalui website rsa.ciptakarya.pu.go.id oleh Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan Direktorat Jendral Cipta Karya Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). Respon spektrum desain yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 40 berikut ini.



Gambar 40 Respon Spektrum Desain Kota Palu

Sumber : Penulis, rsa.ciptakarya.pu.go.id (PUPR)

Bangunan yang penulis teliti berlokasi di Kota Palu dengan koordinat : -0.93, 119,99, sehingga berdasarkan respon spektrum desain, diperoleh data-data yang dapat digunakan dalam analisa *pushover* statik nonlinier yaitu sebagai berikut :

- S_s : 0,7111 g
- S_1 : 0,3345 g
- Kelas Situs : D (batuan sedang)

Adapun data pendukung lainnya yang digunakan sesuai dengan SNI 1726:2019 yang merupakan acuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- *Response Modification*, R : 8 (SRPMK)
- *System Overstrength*, Ω : 3
- *Deflection Amplification*, C_d : 5,5
- *Occupancy Importance*, I : 1
- *Long-Period* : 4

2.6.4 Analisis *Pushover*

2.6.4.1 Pendefinisian *Load Case Pushover*

Analisis *Pushover* dilakukan setelah permodelan gedung telah selesai. Pembebanan pada analisis *Pushover* ini dilakukan dengan dua metode yaitu yang pertama, dilakukan dengan memberikan beban non-linier yaitu beban mati dan beban mati tambahan yang ter *input* pada beban gravitasi, kemudian yang kedua yaitu pemberian beban lateral pada bangunan yang mana akan terjadi peningkatan secara bertahap pada sendi-sendi plastis hingga kondisi bangunan mengalami keruntuhan.

1. Pendefinisian Pembebanan Gravity

Pendefinisian pembebanan gravitasi dilakukan dengan cara klik menu *Define - Load Case - Add New case*, setelah *Load case data* disesuaikan, lalu klik Ok. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tahapan dan Gambar 40 di bawah ini

- a. *Load case name* = Gravity
- b. *Analysis type* = Nonlinier Static
- c. *Initial condition* = Zero initial condition – Start from unstressed state
- d. *Geometric Nonlinearity* = P-Delta
- e. *Load applied*:
 - Load Pattern – Dead – 1
 - Load Pattern – Superdead – 1

Gambar 41 Load Case Data Pembebanan Gravitasi

Sumber : Penulis, SAP2000

2. Pendefinisian Pembebanan Lateral

Pembebanan lateral adalah pembebanan yang terdiri dari pembebanan *Pushover x* dan *Pushover y*. Pembebanan ini dilakukan dengan cara yang sama dengan pembuatan pembebanan pada gravitasi hanya saja yang membedakannya ada pada *Initial Condition*, pengisian *Load Applied* dan pengisian pada *Load Application*. Setelah menu *Load Case Data* muncul berilah nama *Load Case Name* dengan nama *Pushover x* atau *Pushover y* lalu pada *Initial Condition* pilih *Continue from State at End of Nonlinier Case* dan pilih gravitasi pada *Nonlinier Case*, pada pilihan *Load Applied* pilih *Ux* jika yang

dibuat adalah *Pushover x* dan pilih Uy jika yang dibuat adalah *Pushover y*, lalu masukkan nilai -1 pada *Scale Factor*, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tahapan dan Gambar 41 berikut ini.

- a. *Load case name* = Gravity
- b. *Analysis type* = Nonlinier Static
- c. *Initial condition* = Continue State at end of Nonlinier Case – Gravity
- d. *Geometric Nonlinearity* = P-Delta
- e. *Load applied*:
 - Accel – UX – (-1)

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: PUSH-X Set Def Name Modify/Show...

Initial Conditions:
☐ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
☒ Continue from State at End of Nonlinear Case GRAVITY
 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

Other Parameters:
 Load Application: Displ Control Modify/Show...
 Results Saved: Multiple States Modify/Show...
 Nonlinear Parameters: Default Modify/Show...

Load Case Type: Static Design...

Analysis Type:
☐ Linear
☒ Nonlinear

Geometric Nonlinearity Parameters:
☐ None
☒ P-Delta
☐ P-Delta plus Large Displacements

Mass Source: MSSSRC1

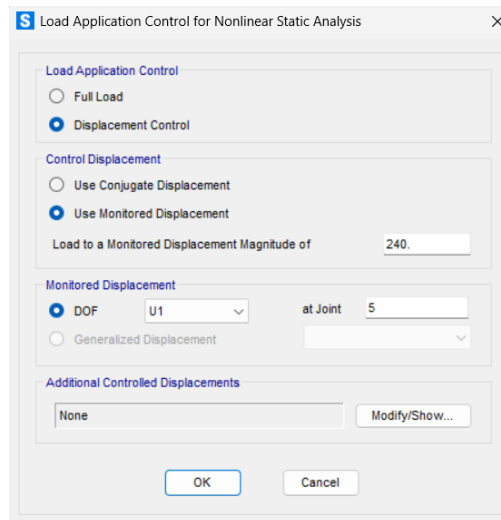
OK Cancel

Gambar 42 Load Case Data Pushover X

Sumber : Penulis, SAP2000

f. Load Application

Setelah selesai mengisi *Load Applied* kemudian modifikasi pada menu *Load Application* dengan cara klik *Modify/Show* setelah muncul tampilan *Load Application Control for NonLinier Static Analysis* kemudian pilih *Displacement Control* pada *Load Application Control*, kemudian pada *Control Displacement* masukkan angka 240 mm (nilai di peroleh 2% dari total tinggi bangunan) pada *Load to a Monitored Displacement Magnitude of*, pada pilihan *Monitored Displacement* pilih U1 (untuk *Pushover x*) dan isi titik *joint* pada atap dengan nilai 5 sesuai dengan titik pusat bangunan lalu klik *Ok*, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 42 berikut ini.

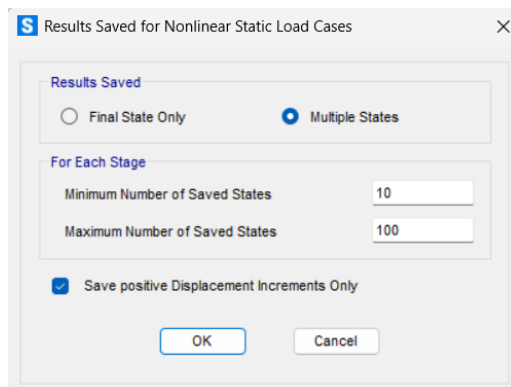


Gambar 43 Load Application Control Pushover X

Sumber : Penulis, SAP2000

g. Result Saved

Pada bagian *Result Saved* klik *Modify/Show* – pilih *Multiple State* pada *Results Saved* – ok, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 43 berikut ini.



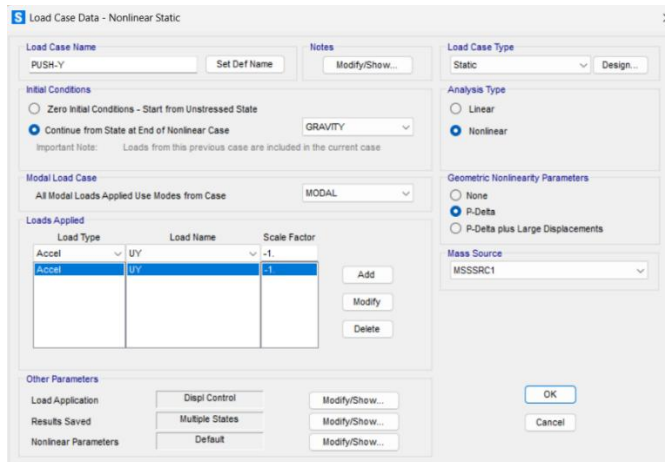
Gambar 44 Result Saved Pushover X

Sumber : Penulis, SAP2000

Selanjutnya untuk pengisian data *Load Case* dan modifikasi nilai *Pushover Y* dapat dilihat pada tahapan berikut ini.

- a. *Load case name* = Gravity
- b. *Analysis type* = Nonlinier Static
- c. *Initial condition* = Continue State at end of Nonlinier Case – Gravity
- d. *Geometric Nonlinearity* = P-Delta

- e. *Load applied:*
- Accel – UY – (-1)

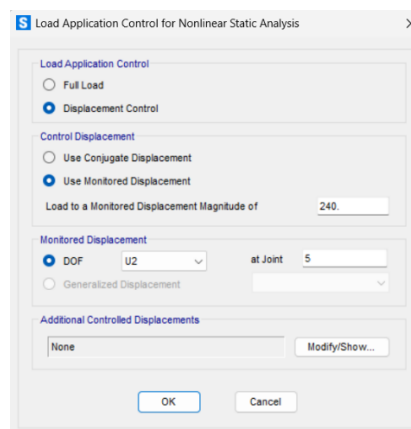


Gambar 45 Load Case Data Pushover Y

Sumber : Penulis, SAP2000

f. *Load Application*

Setelah selesai mengisi *Load Applied* kemudian modifikasi pada menu *Load Application* dengan cara klik *Modify/Show* setelah muncul tampilan *Load Application Control for NonLinear Static Analysis* kemudian pilih *Displacement Control* pada *Load Application Control*, kemudian pada *Control Displacement* masukkan angka 240 mm (nilai di peroleh 2% dari total tinggi bangunan) pada *Load to a Monitored Displacement Magnitude of*, pada pilihan *Monitored Displacement* pilih U2 (untuk *Pushover y*) dan isi titik *joint* pada atap dengan nilai 5 sesuai dengan titik pusat bangunan lalu klik *Ok*, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 45 berikut ini.

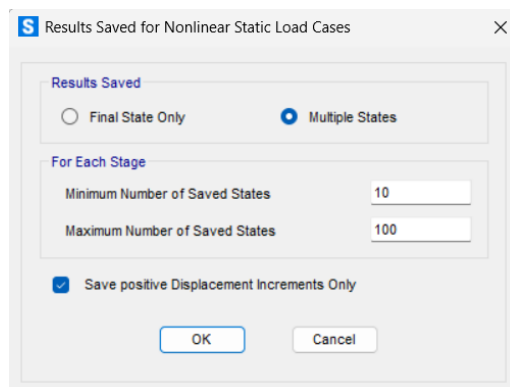


Gambar 46 Load Application Control Pushover Y

Sumber : Penulis, SAP2000

g. Result Saved

Pada bagian *Result Saved* klik *Modify/Show* – pilih *Multiple State* pada *Results Saved* – ok, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 46 berikut ini.



Gambar 47 Result Saved Pushover Y

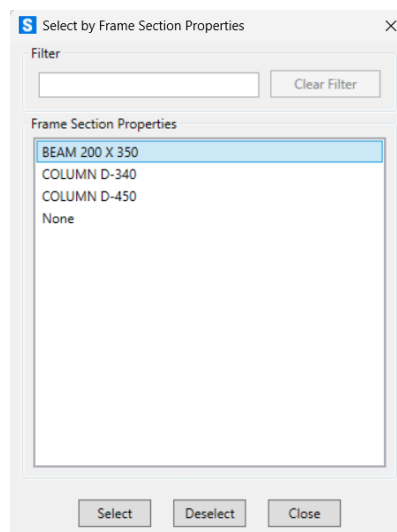
Sumber : Penulis, SAP2000

2.6.4.2 Pendefinisian Sendi Plastis (*Hinge*)

1. Pendefinisian Sendi Plastis pad Balok

Berikut adalah tahapan dalam melakukan pendefinisian sendi plastis pada SAP2000.

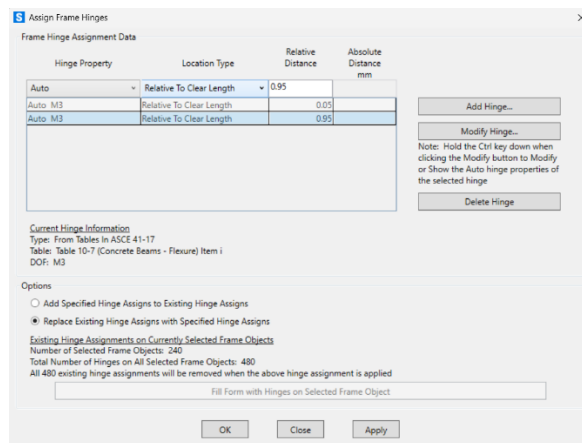
- a. Pilih balok yang akan diberi sendi plastis (*Hinge*) dengan tahapan, klik *Select* – *Properties* – *Frame Section* – pilih balok yang dimodelkan – *Select*.



Gambar 48 Select Frame Balok

Sumber : Penulis, SAP2000

- b. Berikut klik *Assign – Frame – Hinge* – pada bagian *Local Type* pilih *Relative to Clear length* – isikan *Relative distance* lalu klik *Add Hinge*, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 48 berikut ini.

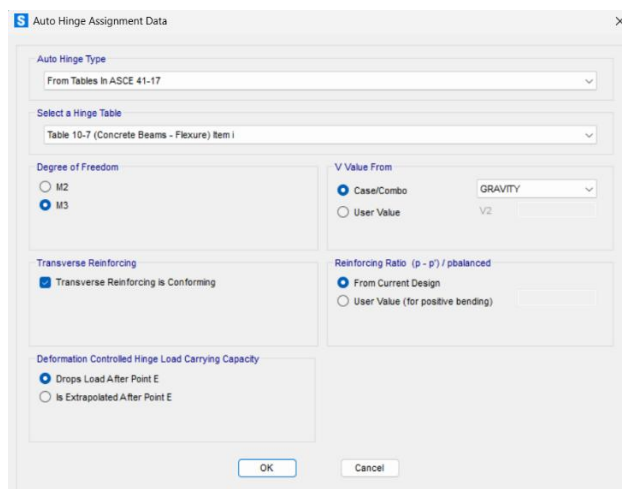


Gambar 49 Input Frame Hinge Balok

Sumber : Penulis, SAP2000

Penginputan sendi plastis pada *Relative Distance* 0,05 dan 0,95 dengan *Type Location* menggunakan *Relative to Clear Length* menunjukkan bahwa sendi plastis pada balok diletakkan di ujung tepi bersih balok.

- c. Berikutnya pada kolom *Auto Hinge* pilih *From Table in ASCE 41-17* - pada kolom *Select a Hinge Table* pilih *Table 10-7 (Concrete Beams - Flexure) item 1* – pada kolom *Degree of Freedom* pilih *M3* – klik *Case/combo* pada *V Value From* pilih *Gravity* lalu Ok, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 49 berikut.



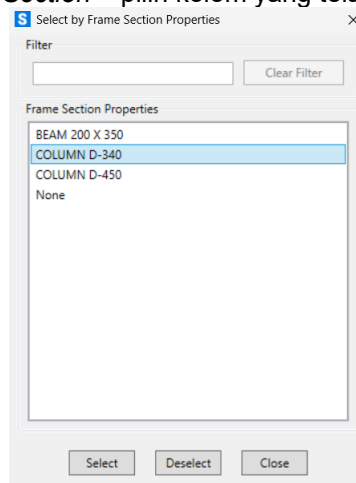
Gambar 50 Setting Hinge Balok

Sumber : Penulis, SAP2000

2. Pendefinisian Sendi Plastis pada Kolom

Pendefinisian sendi plastis pada kolom dilakukan dengan cara yang sama dengan pendefinisian sendi plastis pada balok, yang membedakan hanya pada *Setting Hinge* pada kolom. Berikut adalah tahapan dalam melakukan pendefinisian sendi plastis pada SAP2000.

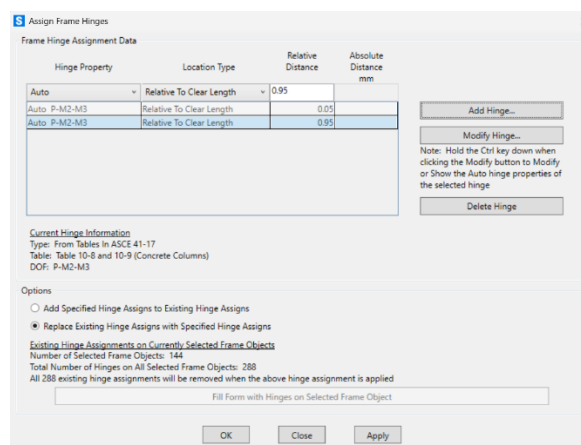
- a. Pilih kolom yang akan diberi sendi plastis (*Hinge*) dengan tahapan klik *Select – Properties – Frame Section* – pilih kolom yang telah dimodelkan – *Select*.



Gambar 51 Select Frame Kolom

Sumber : Penulis, SAP2000

- b. Berikut klik *Assign – Frame – Hinge* – pada bagian *Local Type* pilih *Relative to Clear length* – isikan *Relative distance* lalu klik *Add Hinge*, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 51 berikut ini.

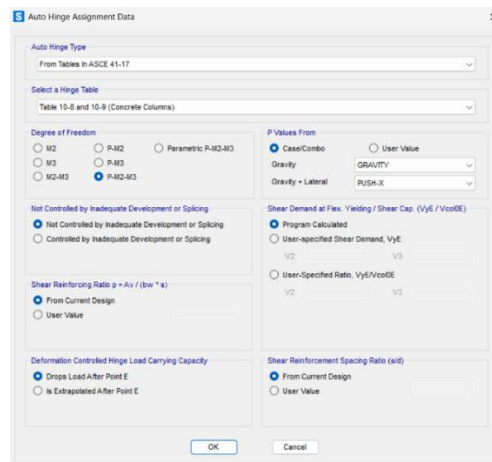


Gambar 52 Input Frame Hinge Kolom

Sumber : Penulis, SAP2000

Penginputan sendi plastis pada *Relative Distance* 0,05 dan 0,95 dengan *Type Location* menggunakan *Relative to Clear Length* menunjukkan bahwa sendi plastis pada balok diletakkan di ujung tepi bersih kolom.

- c. Berikutnya pada kolom *Auto Hinge* pilih *From Table in ASCE 41-17* pada kolom *Select a Hinge* pilih *Table 10-8 and 10-9 (Concrete Columns)* – pada kolom *Degree of Freedom* pilih P-M2-M3 – klik *Case/Combo* pada *V Value From* untuk *Gravity* pilih beban Gravitasi, dan untuk *Gravity + Lateral* pilih beban *Pushover x* atau *Pushover y* lalu klik *Ok*, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 52 berikut ini.

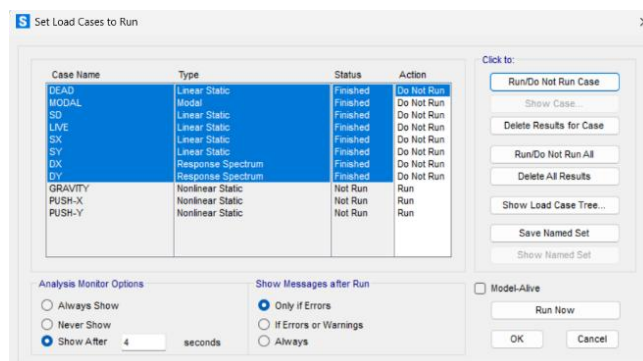


Gambar 53 Setting Hinge Kolom

Sumber : Penulis, SAP2000

2.6.4.3 Running Analysis Pushover

Pada tahapan ini, perhitungan dilakukan secara otomatis melalui software SAP2000 yaitu melalui menu *Analysis* dengan cara klik *Analyze > Run Analysis*. Selanjutnya akan muncul menu *Set Load Cases to Run*. Pada menu tersebut *Run Load Case Gravity, Pushover x* dan *Pushover y*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 53 berikut



Gambar 54 Run Analysis Static Nonlinier

Sumber : Penulis, SAP2000

2.7 Diagram Alir penelitian

