

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Uraian Umum

Kriteria desain untuk struktur bangunan tahan gempa yang sesuai dengan SNI gempa yang berlaku yaitu SNI 03-1726-2019, mensyaratkan bahwa gempa rencana ditetapkan sebagai gempa dengan kemungkinan terlampaui besarnya selama umur struktur bangunan 50 tahun adalah sebesar 2%. Beban gempa termasuk dalam beban yang tidak dapat diperkirakan baik besarnya, arahnya, di mana terjadinya (lokasi), maupun saat terjadinya. Dengan adanya pengaruh gaya lateral pada struktur bangunan yang bersumber dari gempa yang terjadi dapat mengakibatkan terjadinya penurunan kinerja pada struktur bangunan tersebut. Penurunan kinerja pada struktur bangunan akibat gempa yang terjadi dapat mengurangi tingkat keamanan dan umur struktur bangunan tersebut. Hal ini sangat berbahaya bagi penghuni di dalam bangunan tersebut, apabila struktur bangunan tersebut sampai mengalami keruntuhan, baik keruntuhan sebagian maupun keruntuhan total akibat beban gempa yang terjadi.

Berdasarkan penjelasan permasalahan tersebut, maka dalam perencanaan suatu struktur bangunan perlu diperhatikan kinerja struktur bangunan tersebut apabila suatu ketika terjadi gempa bumi yang dapat menyebabkan terjadinya kerusakan pada struktur bangunan tersebut. Untuk itu dalam analisis kali ini penulis akan menggunakan perencanaan struktur berbasis kinerja (*performance based design*). Dalam analisis ini penulis akan menggunakan analisis nonlinear dimana penulis menggunakan dua analisis nonlinear yaitu analisis nonlinear statik beban dorong (*Nonlinear Static Pushover Analysis*) dan analisis nonlinear dinamik riwayat waktu (*Nonlinear Dynamic Time History Analysis*). Untuk mengevaluasi kinerja suatu struktur bangunan ada beberapa cara yang dapat dilakukan, dalam analisis nonlinear ini penulis akan menggunakan dua metode evaluasi kinerja struktur yaitu dengan menggunakan metode *Capacity Spectrum* (ATC-40) dan metode *Displacement Coefficient* (FEMA-356).

Dalam analisis ini penulis akan merencanakan struktur bangunan beton bertulang yang memiliki 10 lantai yang difungsikan sebagai bangunan gedung perkantoran di mana lokasi gedung tersebut direncanakan berada di atas tanah sedang yang terletak di Kabupaten Sleman Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Untuk analisis struktur nonlinear penulis akan menggunakan bantuan program komputer berbasis skrip tcl yang lebih dikenal dengan nama *OpenSees*. Rekayasa gempa *modern* menggunakan pemodelan dan simulasi untuk memahami perilaku dan kinerja sistem selama gempa bumi. Dengan dukungan *National Science Foundation, Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)* telah mengembangkan sistem terbuka untuk simulasi rekayasa gempa bumi, singkatnya *OpenSees* sebagai *platform* perangkat lunak untuk penelitian dan penerapan simulasi untuk sistem struktural dan geoteknik.

2.2. Performance Based Design

Tujuan dari analisis struktur berbasis kinerja (*Performance Based Design*) adalah untuk mengevaluasi tingkat kinerja dari suatu struktur bangunan atau perilaku seismik struktur akibat pembebanan gempa rencana yang diterapkan pada struktur bangunan yang direncanakan. Untuk mengetahui tingkat kinerja dari suatu struktur maka dapat menggunakan syarat atau peraturan tingkat kinerja yang diatur dalam FEMA-356 dan ATC-40.

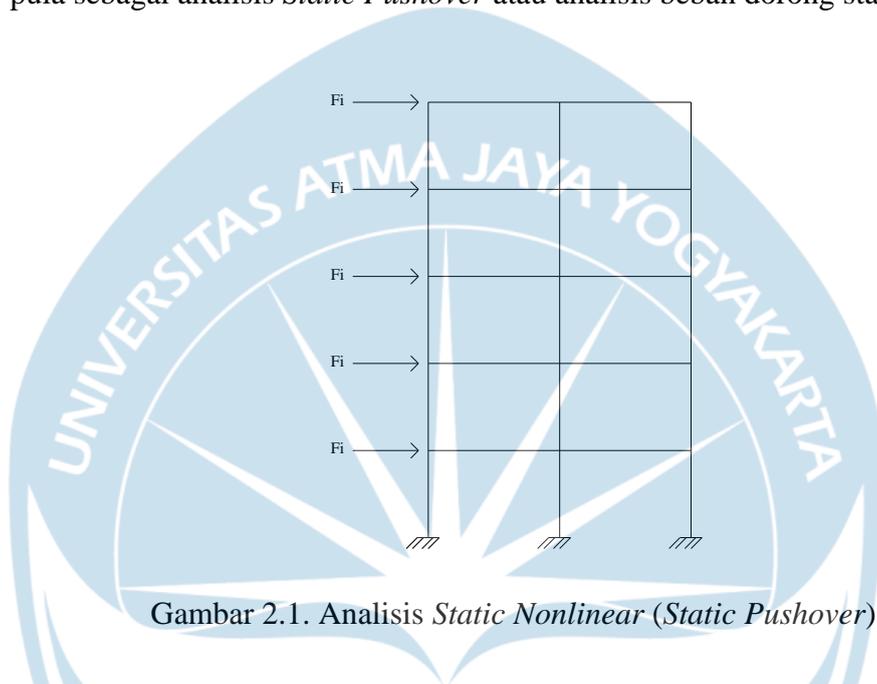
2.3. Analisis Nonlinear

Dari proses analisis nonlinear yang dilakukan, maka akan diperoleh suatu kurva yang biasa disebut sebagai kurva kapasitas (*Capacity Curve*). Pola pembebanan gempa rencana yang biasa digunakan dalam analisis nonlinear umumnya adalah pola pembebanan statik nonlinear dan dinamik nonlinear.

2.3.1. Analisis Static Nonlinear

Analisis *Static Nonlinear* dapat digunakan untuk analisis seismik bangunan, analisis ini dilakukan dengan cara memberikan beban lateral statik pada elemen struktur bangunan, yang kemudian beban lateral statik tersebut

ditingkatkan secara monoton yang mewakili gaya gempa rencana, sampai satu target perpindahan lateral dari suatu titik acuan terlampaui atau tercapai. Pada umumnya titik acuan yang diambil adalah titik pada atap bangunan, atau lebih tepatnya adalah pusat masa atap bangunan. Analisis *Static Nonlinear* dikenal pula sebagai analisis *Static Pushover* atau analisis beban dorong statik.



Gambar 2.1. Analisis *Static Nonlinear* (*Static Pushover*)

A. Gaya Geser Dasar

Perhitungan gaya geser dasar dapat menggunakan persamaan yang terdapat dalam SNI 03-1726-2019 :

$$V = C_s \times W_t \dots\dots\dots(2.1)$$

B. Gaya Lateral

Perhitungan distribusi gaya lateral dapat menggunakan persamaan yang terdapat dalam SNI 03-1726-2019 :

$$F_i = C_{vx} \times V \dots\dots\dots(2.2)$$

$$C_{vx} = \frac{W_i \times h_i^k}{\sum W_i \times h_i^k} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$F_i = \frac{W_i \times h_i^k}{\sum W_i \times h_i^k} \times V \dots\dots\dots(2.4)$$

2.3.2. Analysis Dynamic Nonlinear

Analisis *Dynamic Nonlinear* dapat digunakan untuk analisis seismik bangunan, dimana pada model elemen struktur diberikan atau dikenai gaya gempa rencana yang diwakili oleh catatan riwayat waktu gerakan tanah dengan interval waktu tertentu. Dalam analisis dinamik nonlinear desain perpindahan tidak ditentukan menggunakan target perpindahan, tetapi ditentukan secara langsung melalui analisis dinamis menggunakan riwayat waktu gerakan tanah. Dalam analisis dinamik nonlinear riwayat waktu (*Time History*) ini, beban gempa yang dimasukkan dalam pembebanan struktur adalah rekaman gerakan tanah (*Ground Motion*) dari gempa-gempa yang telah terjadi. Dalam analisis dinamik nonlinear (*Time History*) ini, penulis akan menggunakan beberapa rekaman catatan riwayat waktu gerakan tanah (*Ground Motion Time History*) dari gempa-gempa yang pernah terjadi di beberapa negara yang diperoleh dari PEER *Ground Motion Database NGA – West2*.



Gambar 2.2. PEER *Ground Motion Database* – PEER Center

(sumber https://ngawest2.berkeley.edu/spectras/new?sourceDb_flag=1)

2.4. Evaluasi Tingkat Kinerja Struktur

Evaluasi tingkat kinerja dari suatu struktur bangunan, maka dapat menggunakan syarat yang di atur dalam FEMA-356 dan ATC-40. Oleh karena itu, dalam analisis ini akan menggunakan metode *Displacement Coefficient*

yang diatur dalam FEMA-356 dan metode *Capacity Spectrum* yang diatur dalam ATC-40.

2.4.1. Metode *Displacement Coefficient* (FEMA-356)

Metode koefisien perpindahan atau *Displacement Coefficient Method* (DCM) merupakan metode yang terdapat dalam FEMA-356 yang digunakan untuk prosedur statik nonlinear. Penyelesaian dilakukan dengan memodifikasi respons elastis linear dari sistem SDOF ekuivalen dengan faktor koefisien C_0 , C_1 , C_2 , dan C_3 sehingga dapat dihitung target perpindahan (δ_t). Target perpindahan (δ_t) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini:

$$\delta_t = C_0 \times C_1 \times C_2 \times C_3 \times S_a \times \frac{T_e^2}{4\pi^2} \times g \dots\dots\dots(2.5)$$

$$T_e = T_i \times \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana :

δ_t = target perpindahan

T_e = waktu getar alami efektif (detik)

T_i = waktu getar alami elastis (detik)

K_e = kekakuan lateral efektif bangunan pada arah yang ditinjau

K_i = kekakuan lateral elastis bangunan pada arah yang ditinjau

C_0 = faktor modifikasi, untuk menghubungkan perpindahan spektral sistem SDOF ekuivalen dengan perpindahan atap sistem MDOF gedung yang dihitung menggunakan salah satu prosedur berikut; umumnya memakai faktor partisipasi ragam yang pertama atau berdasarkan Tabel 3-2 FEMA-356.

C_1 = faktor modifikasi untuk menghubungkan perpindahan *inelastic* maksimum dengan perpindahan respons elastik linear. Nilai $C_1 = 1,0$

untuk $T_e \geq T_s$ dan $C_1 = \frac{[1+(R-1) \times \frac{T_s}{T_e}]}{R}$ untuk $T_e < T_s$

C_2 = faktor modifikasi untuk memperhitungkan efek "pinching" dari hubungan beban-deformasi akibat degradasi kekakuan dan kekuatan berdasarkan Tabel 3-3 dari FEMA-356.

C_3 = faktor modifikasi untuk memperhitungkan pembesaran lateral akibat adanya efek P-delta. Untuk gedung dengan perilaku kekakuan pasca-leleh bernilai positif maka $C_3 = 1,0$. Sedangkan untuk gedung dengan perilaku kekakuan pasca-leleh negatif, $C_3 = 1,0 + \frac{|\alpha|(R-1)^{3/2}}{T_e}$

α = rasio kekakuan pasca leleh terhadap kekakuan elastis efektif

T_s = periode karakteristik respon spektrum

R = rasio “ kuat elastis perlu” terhadap “koefisien kuat leleh terhitung”

$$R = \frac{S_a}{\left(\frac{V_y}{W}\right)} \times C_m \dots\dots\dots(2.7)$$

S_a = akselerasi respon spektrum yang berkesesuaian dengan waktu getar alami efektif pada jarak yang ditinjau.

V_y = gaya geser dasar pada saat leleh

W = total beban mati dan beban hidup yang dapat direduksi.

C_m = faktor masa efektif yang diambil dari Tabel 3-1 dari FEMA-356

g = percepatan gravitasi 9,81 m/det².

Tabel 2.1. Nilai untuk Faktor Modifikasi C_1

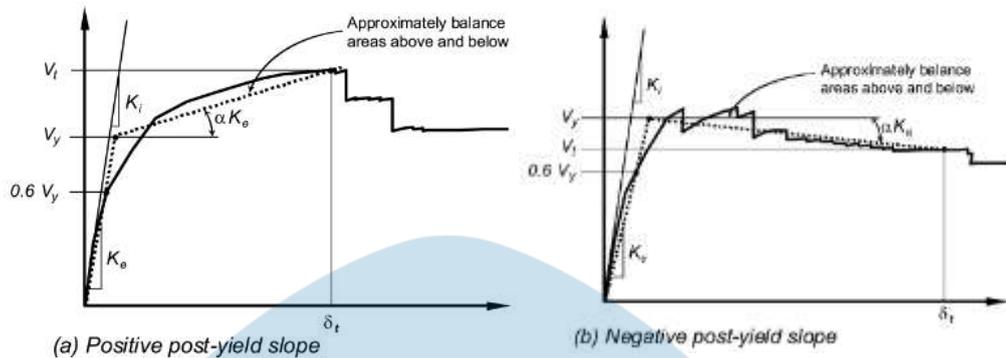
Jumlah Lantai	Bangunan Geser		Bangunan Lainnya
	Pola Beban Segitiga	Pola Beban Seragam	Setiap Pola Beban
1	1,0	1,0	1,0
2	1,2	1,15	1,2
3	1,2	1,2	1,3
5	1,3	1,2	1,4
10 +	1,3	1,2	1,5

Tabel 2.2. Nilai untuk Faktor Modifikasi C_2

Tingkat Kinerja Struktural	$T \leq 0,1$		$T \geq T_s$	
	Rangka Tipe 1	Rangka Tipe 2	Rangka Tipe 1	Rangka Tipe 2
<i>Immediate Occupancy</i>	1,0	1,0	1,0	1,0
<i>Life Safety</i>	1,3	1,0	1,1	1,0
<i>Collapse Prevention</i>	1,5	1,0	1,2	1,0

2.4.2. Kurva Gaya-Perpindahan ideal menurut FEMA-356

Kurva gaya – perpindahan ideal adalah kurva yang menggambarkan hubungan gaya – perpindahan nonlinear antara gaya geser dasar dan perpindahan pada node yang ditinjau. Hubungan ini harus diganti dengan hubungan yang diidealkan untuk menghitung kekakuan efektif lateral (K_e) dan kuat geser leleh efektif (V_y). Hubungan ini harus bilinear dengan kemiringan awal (K_e) dan kemiringan pasca leleh (α). Garis segmen pada kurva gaya-perpindahan ideal harus ditempatkan dengan menggunakan prosedur grafis iteratif yang kira-kira menyeimbangkan area di atas dan di bawah kurva. Kekakuan lateral efektif (K_e) harus diambil sebagai kekakuan garis potong yang dihitung pada gaya geser dasar sama dengan 60% dari kuat luluh efektif struktur. Kemiringan pasca leleh harus ditentukan oleh garis segmen yang melewati kurva aktual (kurva sebenarnya) pada target perpindahan yang dihitung. Kuat leleh efektif (K_e) tidak boleh diambil lebih besar dari maksimum gaya geser dasar pada setiap titik sepanjang kurva aktual (kurva sebenarnya).



Gambar 2.3. Kurva Gaya – Perpindahan Ideal menurut FEMA 356

(sumber FEMA 356)

2.4.3. Tingkat Kinerja Struktur Menurut FEMA-356

Tingkat kinerja struktur menurut FEMA-356 dinyatakan dalam target tingkat kinerja bangunan. Target tingkat kinerja bangunan adalah status kerusakan terpisah yang dipilih dari spektrum tak terbatas dari kemungkinan status kerusakan yang dapat dialami bangunan selama gempa bumi. Tingkat kinerja struktur menurut FEMA-356 dibagi menjadi beberapa tingkat kinerja yaitu:

1. *Immediate Occupancy S-1 (IO)*

Immediate Occupancy S-1 didefinisikan sebagai keadaan kerusakan pasca gempa dimana hanya terjadi kerusakan struktural yang sangat terbatas. Sistem penahan gaya vertikal dan lateral dasar bangunan mempertahankan hampir semua kekuatan dan kekakuan sebelum gempa. Resiko cedera yang mengancam jiwa akibat kerusakan struktural sangat rendah, dan meskipun beberapa perbaikan struktural kecil mungkin diperlukan, ini umumnya tidak diperlukan sebelum penempatan kembali.

2. *Damage Control S-2 (DC)*

Damage Control S-2 didefinisikan sebagai rentang status kerusakan yang berkelanjutan antara tingkat kinerja struktural *Life Safety S-3* dan *Immediate Occupancy S-1*.

3. *Life Safety S-3 (LS)*

Life Safety S-3 berarti keadaan kerusakan paska gempa dimana telah terjadi kerusakan signifikan pada struktur, tetapi beberapa margin terhadap keruntuhan struktural sebagian atau total tetap ada. Beberapa elemen dan komponen struktur rusak parah, tetapi hal ini tidak mengakibatkan bahaya puing-puing besar yang jatuh, baik di dalam maupun di luar gedung. Cedera dapat terjadi selama gempa bumi, namun resiko keseluruhan cedera yang mengancam jiwa akibat kerusakan struktural diperkirakan rendah. Seharusnya dimungkinkan untuk memperbaiki struktur, namun karena alasan ekonomi hal ini mungkin tidak praktis. Walaupun struktur yang rusak bukan merupakan resiko keruntuhan yang akan segera terjadi, akan lebih bijaksana untuk menerapkan perbaikan struktural atau memasang bresing sementara sebelum ditempati kembali.

4. *Limited Safety S-4 (LS)*

Limited Safety S-4 didefinisikan sebagai rentang status kerusakan berkelanjutan antara tingkat kinerja struktural *Life Safety S-3* dan *Collapse Prevention S-5*.

5. *Collapse Prevention S-5*

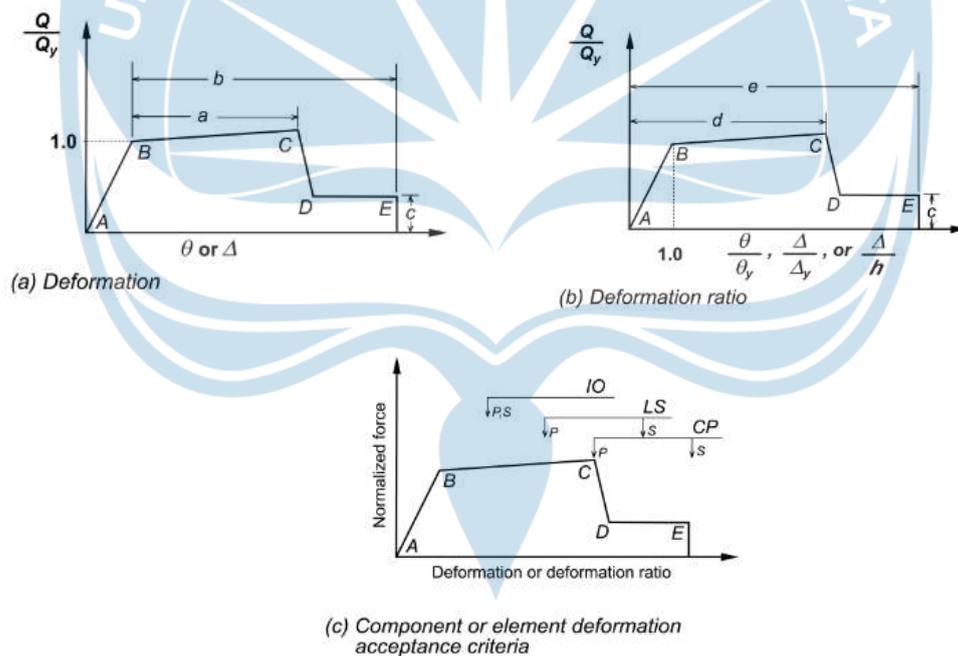
Collapse Prevention S-5 adalah keadaan kerusakan paska gempa dimana bangunan berada diambang keruntuhan sebagian atau seluruhnya. Kerusakan substansial pada struktur telah terjadi, yang berpotensi termasuk degradasi yang signifikan dalam kekakuan dan kekuatan sistem penahan gaya lateral, deformasi lateral permanen yang besar dari struktur, dan sampai tingkat yang lebih terbatas, degradasi dalam kapasitas dukung beban vertikal. Namun semua komponen penting dari sistem penahan beban gravitasi harus terus memikul tuntutan beban gravitasinya. Resiko cedera yang signifikan karena bahaya jatuh dari puing-puing struktural mungkin ada. Struktur mungkin secara teknis tidak praktis untuk diperbaiki dan tidak aman untuk ditempati kembali, karena aktifitas gempa susulan dapat menyebabkan keruntuhan.

6. *Not Considered S-6 (NC)*

Rehabilitasi bangunan gedung yang tidak memperhatikan kinerja struktur diklasifikasikan sebagai kinerja struktur *Not Considered S-6*.

Tabel 2.3. Tingkat kinerja struktur menurut FEMA-356

Elemen	Jenis	Tingkat Kinerja Struktural		
		<i>Immediate Occupancy</i> S-1	<i>Life Safety</i> S-3	<i>Collapse Prevention</i> S-5
Rangka Beton	<i>Drift</i>	1 % Sementara, Diabaikan Permanen	1 % Permanen, 2 % Sementara	4 % Sementara atau Permanen

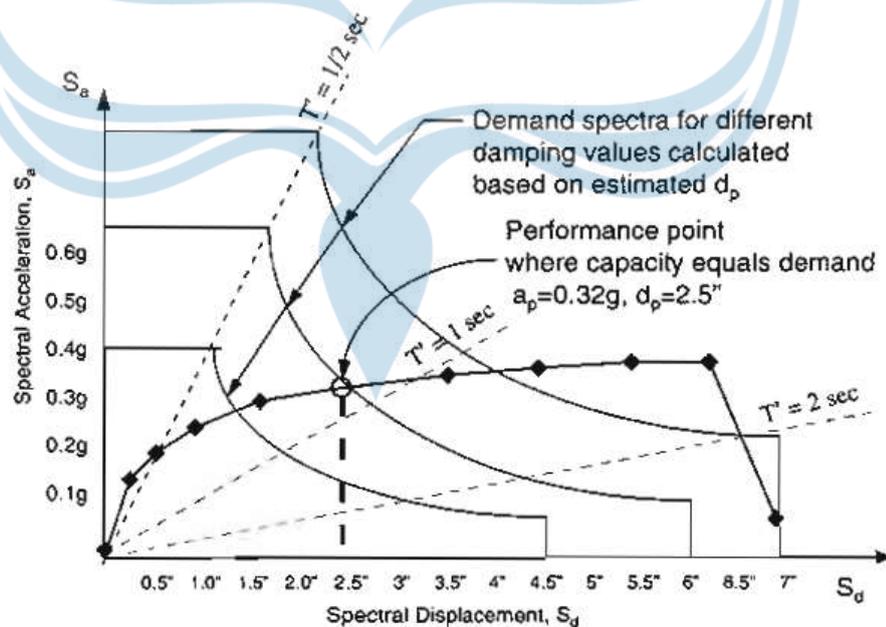


Gambar 2.4. Tingkat Kinerja Struktur Menurut FEMA-356

(sumber FEMA-356)

2.4.4. Metode *Capacity Spectrum* ATC-40

Metode *Capacity Spectrum* menyajikan secara grafis dua buah grafik atau kurva yaitu kurva spektrum kapasitas (*Capacity Spectrum*) dan kurva respon spektrum (*Demand Spectrum*). Dari kedua kurva yang disajikan, maka akan terbentuk titik perpotongan antara kedua kurva tersebut yang biasa disebut sebagai *performance point*. *Performance point* adalah titik berpotongan antara kurva spektrum kapasitas (*capacity spektrum curve*) dengan kurva respon spektrum (*Demand Spectrum*) seperti yang dipergunakan dalam *capacity spectrum method* (ATC-40, 1996). Pada *performance point* dapat diperoleh informasi mengenai berapa nilai *spectral acceleration* (S_a) dan *spectral displacement* (S_d), dari kedua nilai tersebut (S_a dan S_d) maka dapat dihitung nilai gaya geser dasar (V) dan *displacement* pada atap (Δ_{roof}) yang terjadi pada struktur bangunan akibat gaya gempa rencana. Untuk mengetahui gambaran lebih jelas mengenai *performance point* dapat dilihat pada gambar di bawah ini:

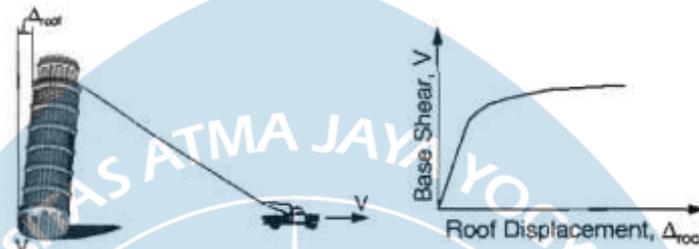


Gambar 2.5. *Performance Point* pada *Capacity Spectrum Method*

(sumber ATC – 40)

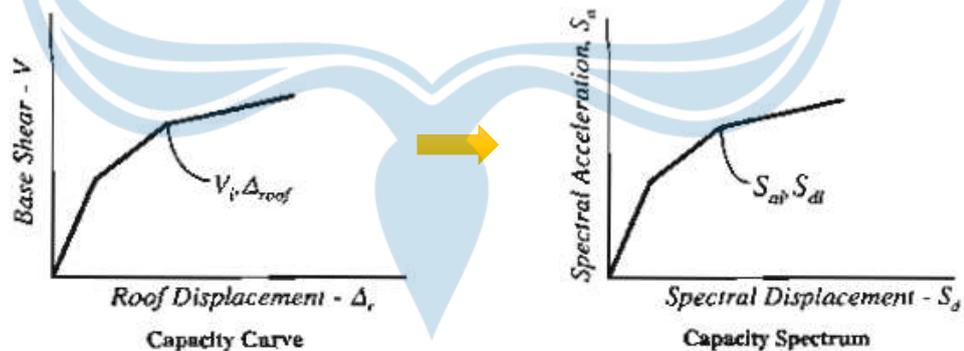
2.4.5. Kurva Kapasitas

Kurva kapasitas adalah kurva yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar (V) dan perpindahan pada atap (Δ_{roof}). Kurva kapasitas akan memperlihatkan suatu kondisi linear sebelum mencapai kondisi leleh dan selanjutnya berperilaku nonlinear.

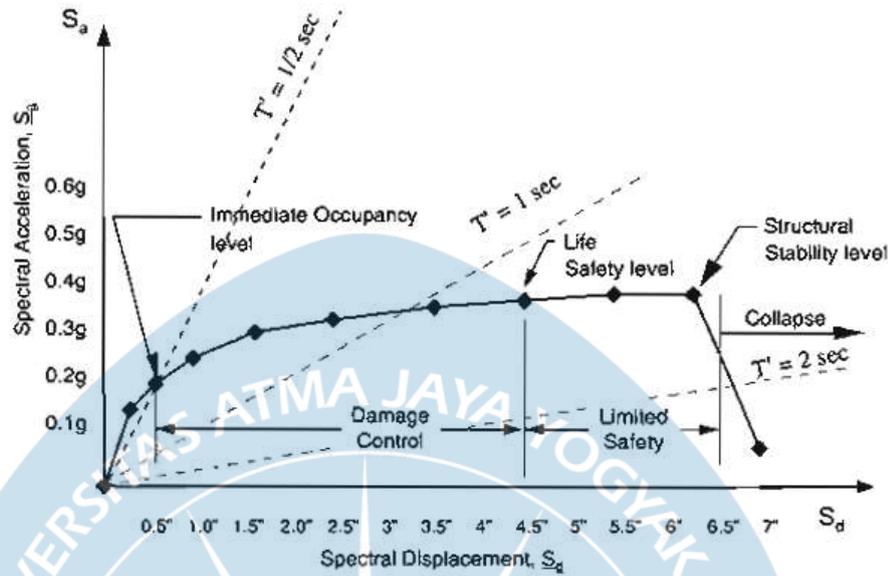


Gambar 2.6. Kurva Kapasitas
(sumber ATC – 40)

Kurva kapasitas (*Capacity Curve*) yang diperoleh dari hasil analisis nonlinear kemudian diubah menjadi kurva spektrum kapasitas (*Capacity Spectrum*) seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6 dengan menggunakan persamaan 2.4 sampai 2.7 (ATC-40, 1996).



Gambar 2.7. Modifikasi *Capacity Curve* menjadi *Capacity Spectrum*
(sumber ATC – 40)



Gambar 2.8. Capacity Spectrum
(sumber ATC - 40)

$$S_a = \frac{\left(\frac{V}{W}\right)}{\alpha_1} \dots\dots\dots(2.8)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{atap}}{PF_1 \times \Phi_{atap,1}} \dots\dots\dots(2.9)$$

$$PF_1 = \frac{\left[\frac{\sum_{i=1}^N \frac{W_i \times \Phi_{i1}}{g}}{\sum_{i=1}^N \frac{W_i \times \Phi_{i1}^2}{g}} \right]}{\dots\dots\dots(2.10)}$$

$$\alpha_1 = \frac{\left[\frac{\sum_{i=1}^N \frac{W_i \times \Phi_{i1}}{g} \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^N \frac{W_i}{g} \right] \times \left[\sum_{i=1}^N \frac{W_i \times \Phi_{i1}}{g} \right]} \dots\dots\dots(2.11)$$

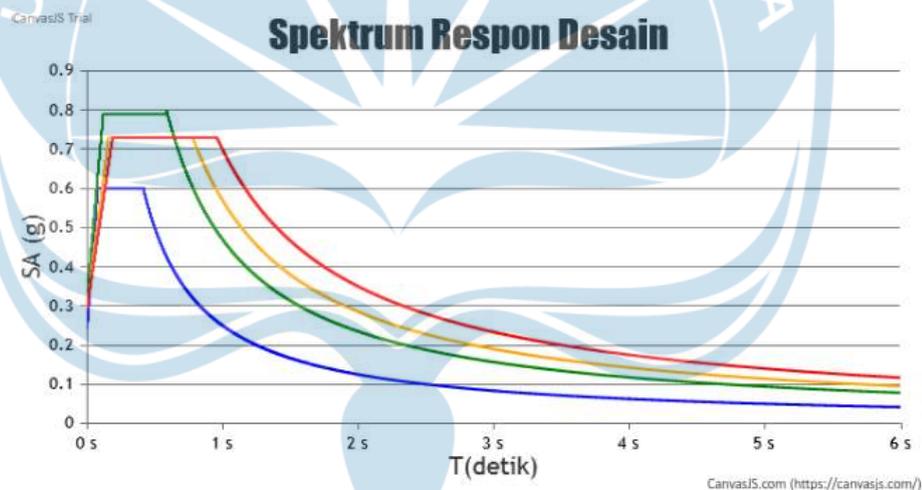
Dimana :

- S_a = Spectral acceleration
- S_d = Spectral displacement
- PF_1 = modal participation untuk modal pertama
- α_1 = modal mass coefficient untuk modal pertama
- Φ_1 = amplitude of first untuk level i
- V = gaya geser dasar
- W = berat mati bangunan ditambah beban hidup

- $\Delta_{\text{roof}} = \text{roof displacement}$
- $\frac{W_i}{g} = \text{massa pada level ke } i$

2.4.6. Kurva Respon Spektrum (*Demand Spectrum*)

Kurva respon spektrum adalah kurva yang menunjukkan hubungan antara *Spectral Acceleration* (S_a) dan *Spectral Displacement* (S_d) akibat gempa dengan periode ulang tertentu. Kurva respon spektrum dibuat berdasarkan dimana lokasi gedung atau bangunan yang direncanakan berada, dalam analisis ini lokasi bangunan gedung berada di Kabupaten Sleman Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Kurva respon spektrum desain dapat diperoleh dari PUSKIM PUPR (Desain Spektra Indonesia – Kementerian PUPR).



Gambar 2.9. Spektrum Respon Desain Kabupaten Sleman

(Sumber <http://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/>)

Keterangan :

- SB – Batuan (Biru)
- SC – Tanah Keras, Batuan Lunak (Hijau)
- SD – Tanah Sedang (Kuning)
- SE – Tanah Lunak (Merah)

2.4.7. Tingkat Kinerja Struktur Menurut ATC-40

Perencanaan struktur tahan gempa berbasis kinerja melalui beberapa proses yang diawali dengan membuat model rencana bangunan kemudian melakukan percobaan kinerjanya terhadap berbagai intensitas gempa. Setiap percobaan memberikan informasi tingkat kerusakan (*Level of Damage*), ketahanan struktur sehingga dapat memperkirakan tingkat keselamatan (*Life*), kesiapan pakai (*Occupancy*) dan kerugian harta benda (*Economic Loss*) yang akan terjadi. Menurut ATC-40 yang menjadi salah satu acuan dalam perencanaan berbasis kinerja pada analisis kali ini, yang termasuk kategori kriteria-kriteria struktur tahan gempa adalah sebagai berikut :

1. *Immediate Occupancy* (IO) SP-1

Keadaan kerusakan paska gempa dimana hanya terjadi kerusakan struktural yang sangat terbatas. Sistem penahan gaya dasar vertikal dan lateral bangunan mempertahankan hampir semua karakteristik dan kapasitas sebelum gempa. Resiko cedera yang mengancam jiwa akibat kegagalan struktur dapat diabaikan dan bangunan harus aman untuk jalan keluar, masuk dan hunian yang tidak terbatas.

2. *Damage Control* (DC) SP-2

Istilah ini sebenarnya bukan level tertentu tetapi kisaran status kerusakan paska gempa yang dapat bervariasi dari SP-1, *Immediate Occupancy* hingga SP-3, *Life Safety*. Inii menyediakan tempat untuk banyak situasi di mana mungkin diinginkan untuk membatasi kerusakan struktural di luar tingkat *Life Safety*, tetapi *Occupancy* bukanlah masalahnya. Contoh pengendalian kerusakan termasuk perlindungan fitur arsitektur yang signifikan dari bangunan bersejarah atau konten berharga.

3. *Life Safety* (LS) SP-3

Keadaan kerusakan paska gempa di mana kerusakan signifikan pada struktur mungkin telah terjadi tetapi masih ada margin terhadap keruntuhan struktural total atau sebagian. Tingkat kerusakan lebih rendah dibandingkan dengan tingkat stabilitas struktur. Komponen struktural utama tidak copot dan jatuh mengancam keselamatan jiwa baik di dalam

maupun di luar gedung. Sementara cedera selama gempa dapat terjadi, resiko cedera yang mengancam jiwa akibat kerusakan struktural sangat rendah. Diharapkan bahwa perbaikan struktural yang ekstensif mungkin akan diperlukan sebelum bangunan tersebut digunakan kembali, meskipun kerusakan mungkin tidak selalu dapat diperbaiki secara ekonomis. Tingkat kinerja struktural ini dimaksudkan agar lebih rendah dari tingkat kinerja yang diharapkan dari bangunan baru yang sepenuhnya mematuhi kode.

4. *Limited Safety (LS) SP-4*

Istilah ini sebenarnya bukan level tertentu tetapi rentang status kerusakan pasca gempa yang kurang dari SP-3, *Life Safety* dan lebih baik dari SP-5, *Structural Stability*. Ini menyediakan tempat untuk situasi di mana retrofit mungkin tidak memenuhi semua persyaratan struktural tingkat *Life Safety*, tetapi lebih baik daripada tingkat *Structural Stability*. Keadaan ini termasuk kasus-kasus ketika tingkat *Life Safety* yang lengkap tidak efektif dari segi biaya, atau ketika hanya beberapa kekurangan struktural kritis yang dikurangi. (Tingkat kinerja nonstruktural yang digunakan dalam kisaran ini bervariasi dan akan bergantung pada maksud dari pengendalian struktur)

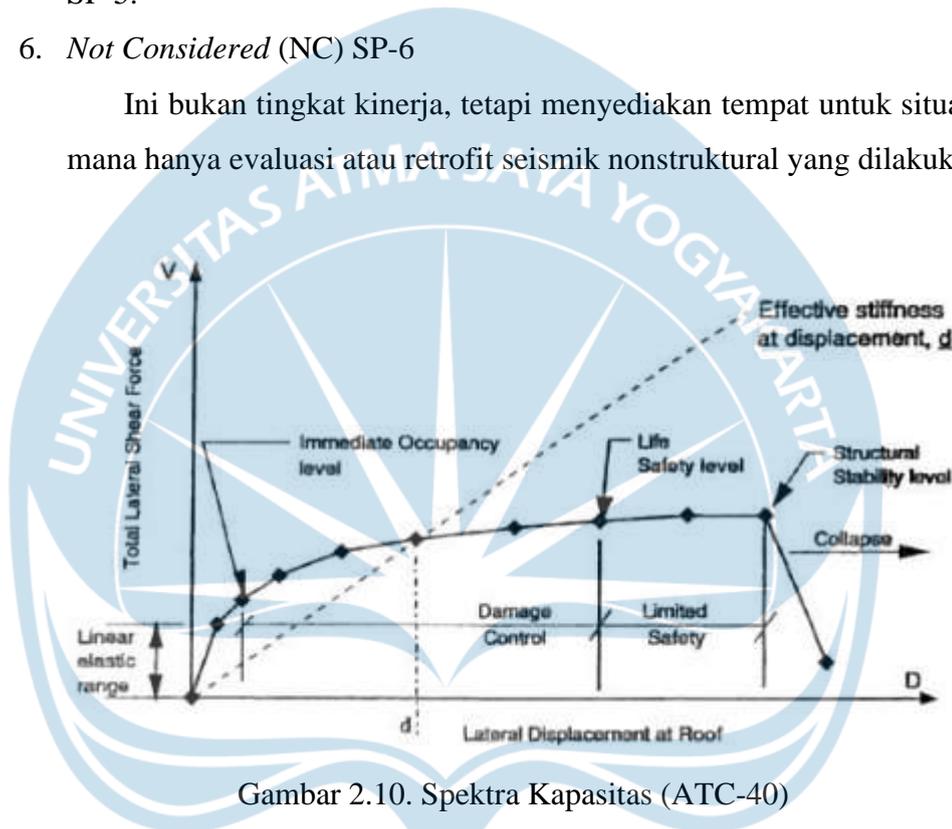
5. *Structural Stability (SS) SP-5*

Tingkat ini merupakan batas keadaan kerusakan struktural pasca gempa di mana sistem struktur bangunan berada diambang mengalami keruntuhan sebagian atau seluruhnya. Telah terjadi kerusakan substansial pada struktur, yang berpotensi termasuk degradasi yang signifikan dalam kekakuan dan kekuatan sistem penahan gaya lateral. Namun, semua komponen penting dari sistem penahan beban gravitasi terus memenuhi tuntutan gravitasinya. Meskipun bangunan mempertahankan stabilitasnya secara keseluruhan, resiko cedera yang signifikan akibat bahaya jatuh mungkin ada baik di dalam maupun di luar gedung dan gempa susulan yang signifikan dapat menyebabkan keruntuhan. Diharapkan bahwa perbaikan struktural besar yang signifikan akan diperlukan sebelum ditempati kembali. Pada tipe bangunan beton lama yang dipertimbangkan

dalam dokumen ini, kemungkinan besar kerusakan tersebut tidak dapat diperbaiki secara teknis atau ekonomis. Bahaya jatuh tidak secara khusus dicegah untuk mencapai tingkat kinerja ini. Oleh karena itu NP-6 (Kinerja nonstruktural tidak dipertimbangkan) biasanya dikombinasikan dengan SP-5.

6. *Not Considered (NC) SP-6*

Ini bukan tingkat kinerja, tetapi menyediakan tempat untuk situasi di mana hanya evaluasi atau retrofit seismik nonstruktural yang dilakukan..



Gambar 2.10. Spektra Kapasitas (ATC-40)

Untuk mengetahui tingkat kinerja struktur dapat menggunakan persamaan dibawah ini :

$$\text{Maximum Total Drift} = \frac{D_t}{H} \dots\dots\dots(2.12)$$

$$\text{Maximum Inelastic Drift} = \frac{D_t - D_1}{H} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana :

- D_t = Target Displacement (m)
- D_1 = Displacement pertama (m)
- H = Tinggi total bangunan (m)

Menurut ATC-40 batasan rasio *Drift* atap untuk berbagai macam kategori tingkat kinerja struktur dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut ini :

Tabel 2.4. Tingkat Kinerja Bangunan Gedung Berdasarkan Batas Deformasi (*Deformation Limit*) menurut ATC-40

Tingkat Kinerja				
Interstory Drift Limit (Batas Simpangan Antar Lantai)	<i>Immediate Occupancy</i>	<i>Damage Control</i>	<i>Life Safety</i>	<i>Structural Stability</i>
<i>Maximum Total Drift</i> (Simpangan Total Maksimum)	0,01	0,01 – 0,02	0,02	0,33 V_i / P_i
<i>Maximum Inelastic Drift</i> (Simpangan Nonelastis Maksimum)	0,005	0,005-0,015	<i>No Limit</i>	<i>No Limit</i>

2.5. OpenSees

OpenSees merupakan kerangka kerja perangkat lunak untuk aplikasi simulasi saat gempa, rekayasa menggunakan metode elemen hingga. *OpenSees* adalah kerangka kerja perangkat lunak *open source* yang menggunakan metodologi berorientasi objek untuk memaksimalkan modularitas dan ekstensibilitas untuk menerapkan perilaku model, solusi metode, pemrosesan data, dan prosedur komunikasi. Kerangka kerja adalah seperangkat kelas yang saling terkait seperti domain (data struktur), model, elemen, solusi algoritma, integrator, penyelesaian persamaan dan basis data. *OpenSees* cepat, stabil, dan efisien dalam menyelesaikan masalah besar model nonlinear dengan banyak proses.

OpenSees memungkinkan pengguna untuk membuat aplikasi elemen hingga untuk mensimulasikan respon sistem struktural dan geoteknik yang mengalami gempa bumi. Pengguna *OpenSees* membuat aplikasi dengan

menulis skrip dalam bahasa pemrograman Tcl atau Python. Kerangka kerja ini dikembangkan oleh Frank McKenna dan Gregory L. Fenves dengan kontribusi signifikan dari Michael H. Scott, Terje Haukaas, Armen Der Kiureghian, Remo M. De Souza, Filip C. Fillippou, Silvia mazzoni dan Boris Jeremic. *OpenSees* ditulis dalam C++ dan menggunakan beberapa perpustakaan numerik Fortran untuk penyelesaian persamaan linear.

Dalam analisis ini penulis akan menggunakan program bantuan *OpenSees* 3.2.0 - 64.exe yang diperoleh dengan cara mendownload atau mengunduh secara gratis di <https://opensees.berkeley.edu/>.



Gambar 2.11. Tampilan Program *OpenSees*
(sumber <https://opensees.berkeley.edu/>)