

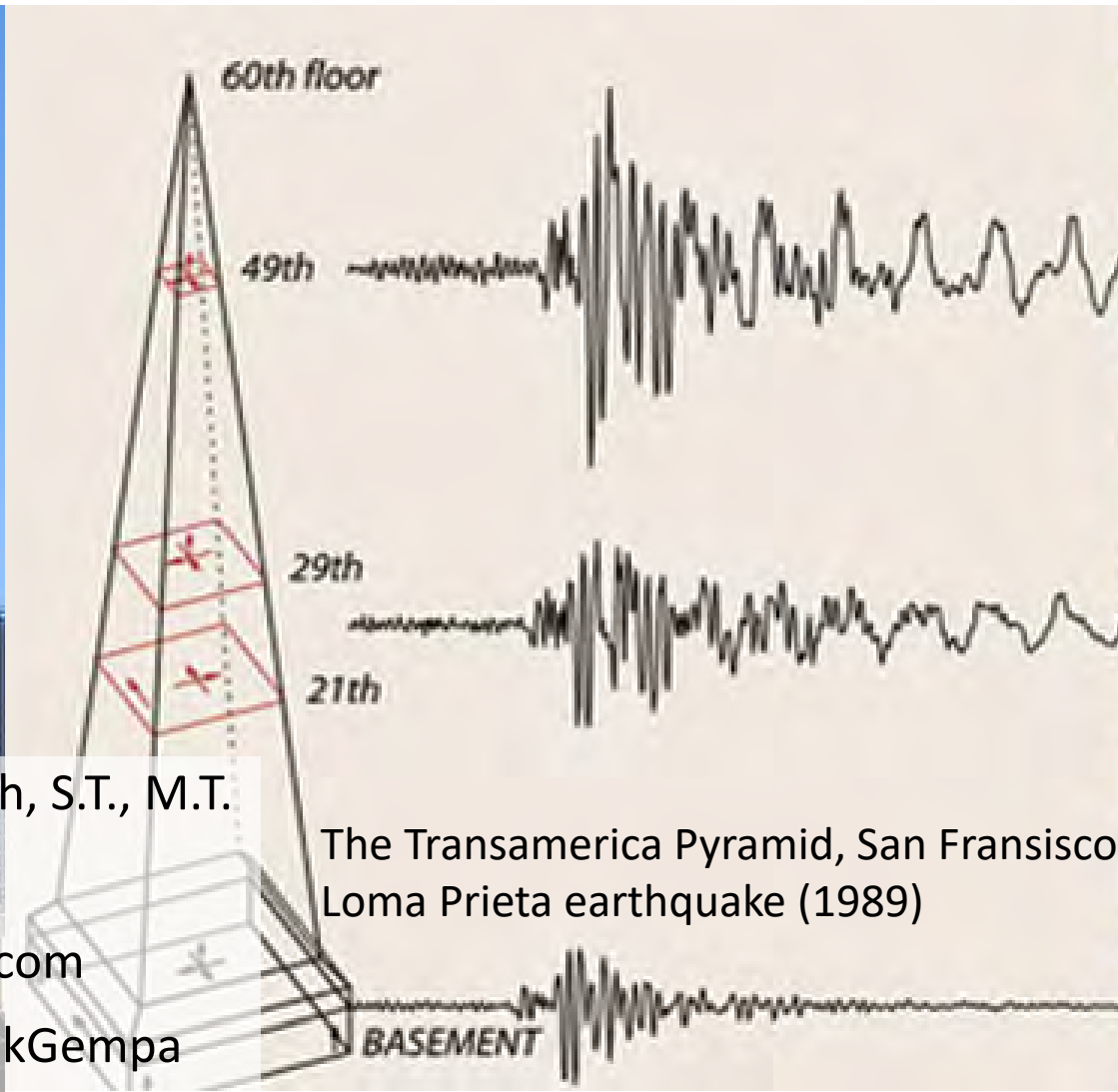


TKS 420214

M-07 Pushover Analysis –
Performance Based Design

Dinamika Struktur dan Gempa

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya




Pengajar: Dr. Siti Aisyah Nurjannah, S.T., M.T.

Phone: 081373672011

E-mail: hana.program.17@gmail.com

Available on: <http://bit.ly/DinstrukGempa>

The Transamerica Pyramid, San Fransisco
Loma Prieta earthquake (1989)



Nonlinear Static Analysis (disebut juga sebagai *Pushover Analysis*)

Pushover Analysis merupakan bagian dari ***Performance Based Design***

Nonlinear Static Analysis atau *Pushover Analysis*

- ❖ ***Nonlinier static analysis*** adalah prosedur untuk mengetahui **perilaku keruntuhan suatu bangunan terhadap gempa**, yang dikenal pula sebagai ***pushover analysis*** atau analisis beban dorong statik.
- ❖ Dalam *pushover analysis*, terdapat suatu **pola beban lateral statik** yang diterapkan pada struktur (Gambar 1). **Beban tersebut ditingkatkan secara bertahap** dengan faktor pengali sampai **target perpindahan** lateral pada suatu titik acuan tercapai atau **struktur mengalami keruntuhan**. Umumnya, titik acuan berlokasi di atap, atau lebih akurat lagi adalah pusat massa atap.
- ❖ Dalam proses *pushover*, struktur didorong sampai mengalami **leleh** di satu atau lebih lokasi **sendi plastis** di struktur tersebut. Hasil *pushover analysis* adalah **kurva kapasitas (*capacity curve*)** hubungan antara **gaya geser dasar** (V atau V_b) dengan **perpindahan titik acuan** pada atap (Gambar 3 dan 4). Bentuk kurva *pushover* dipengaruhi oleh pola distribusi beban lateral statik.

Nonlinear Static Analysis atau *Pushover Analysis*

❖ Tujuan analisis *pushover*:

- memperkirakan **gaya dan deformasi maksimum** yang terjadi sebelum struktur runtuh atau pada saat target perpindahan tercapai
- memperoleh **informasi lokasi sendi plastis yang kritis** dan memerlukan detail khusus
- hasil analisis *pushover* dikembangkan lebih lanjut menjadi *Performance Based Design*

❖ Analisis *pushover* dapat memberikan hasil **cukup akurat** dibandingkan dengan hasil analisis dinamik nonlinier untuk bangunan dengan bentuk **beraturan dan tidak tinggi**.

❖ Hasil analisis *pushover* adalah suatu pendekatan, karena sebenarnya gempa bersifat bolak-balik (**siklik**), sedangkan pembebanan dalam analisis *pushover* adalah **statik monotonik**.

Nonlinear Static Analysis atau *Pushover Analysis*

Pola Beban Lateral (dari FEMA 356):

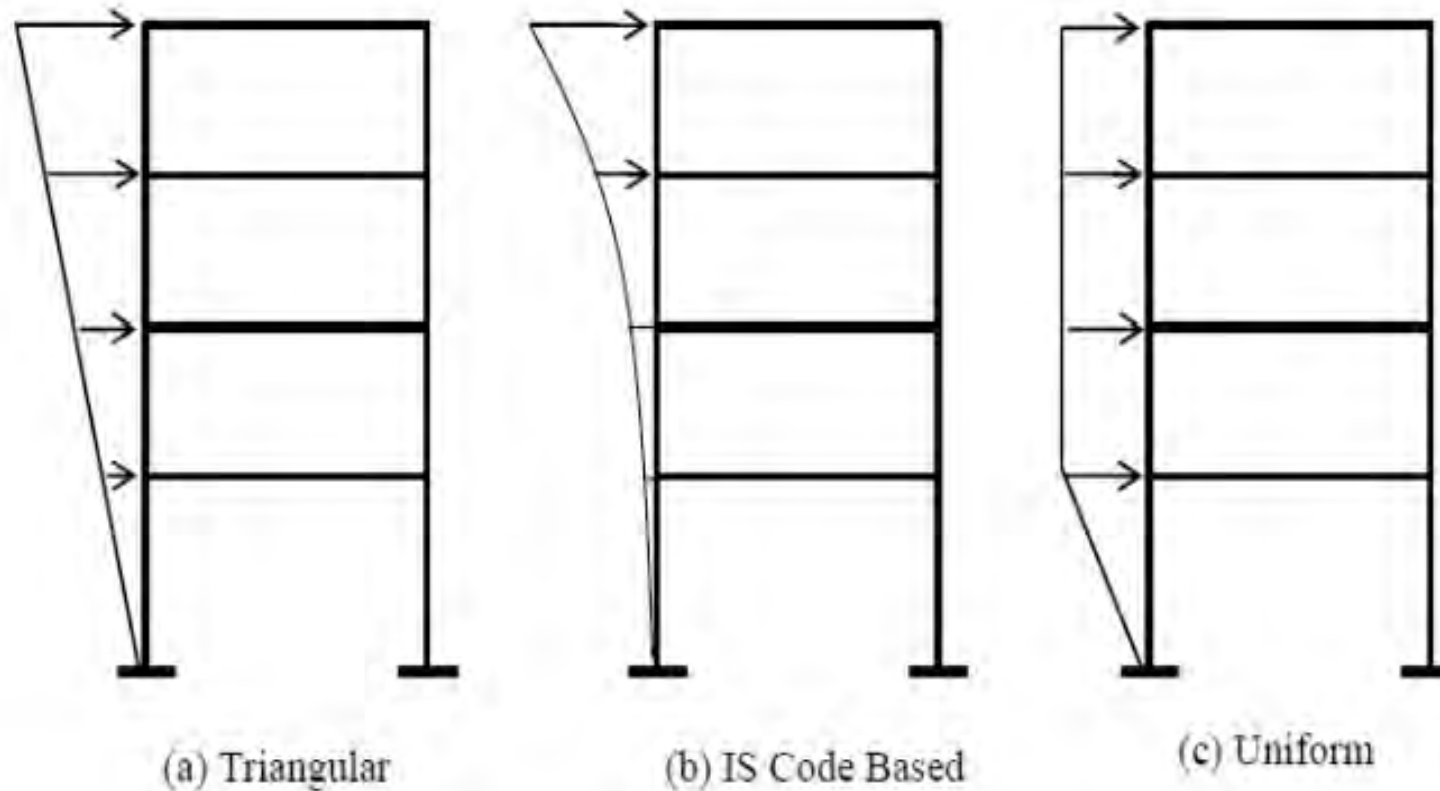
A. Pola ke-1

- **Distribusi vertikal** berdasarkan peraturan berupa gaya lateral yang digunakan dalam *linear static analysis/equivalent static method*
- Suatu distribusi vertikal yang proporsional dengan bentuk mode fundamental pada arah yang sesuai dengan mode tersebut bila sedikitnya **75% massa dapat diantisipasi pada mode tersebut**. Mode ke-1 dan mode ke-2 dominan pada struktur yang memiliki bentuk beraturan.
- Distribusi vertikal yang proporsional dengan distribusi geser tingkat; dihitung dengan menggabungkan respon modal (lihat materi Dinamika Struktur) dari analisis spektrum respons bangunan

B. Pola ke-2

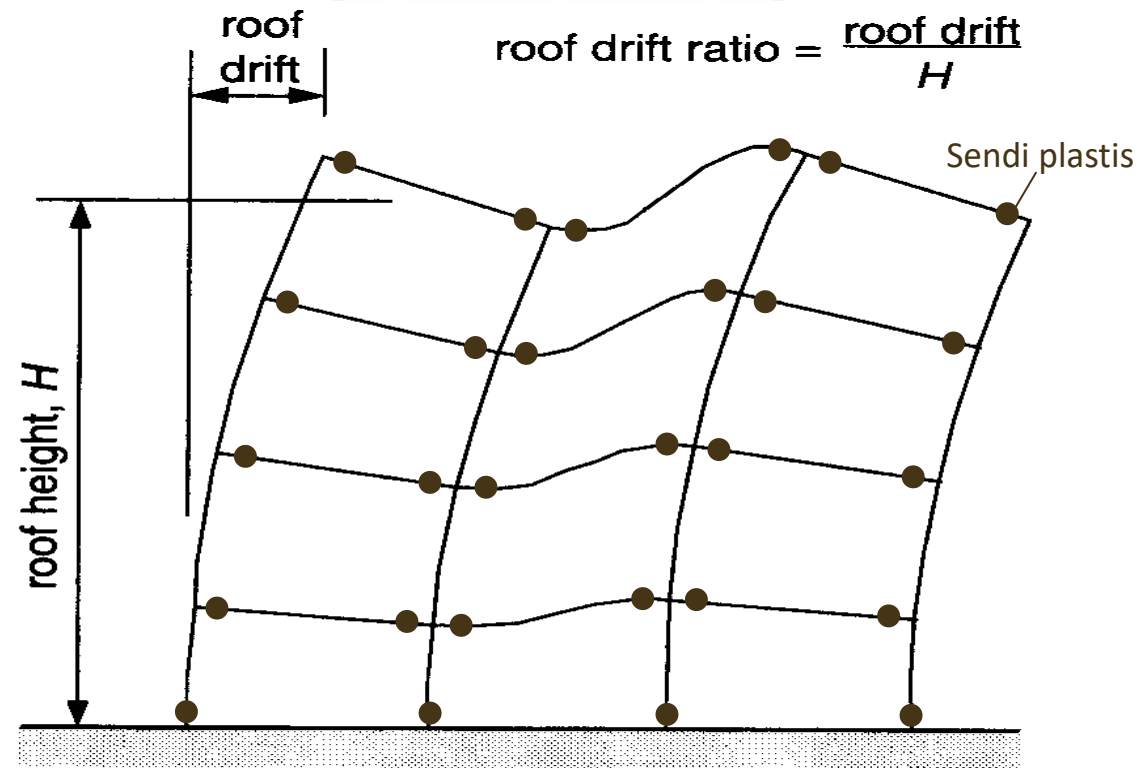
- **Distribusi seragam** beban lateral di setiap tingkat yang proporsional dengan **massa** tingkat terkait
- Distribusi beban adaptif yang berubah jika struktur bergerak

Nonlinear Static Analysis atau *Pushover Analysis*



Gambar 1 Beberapa jenis pola beban lateral
(Sumber: FEMA 356, 2000)

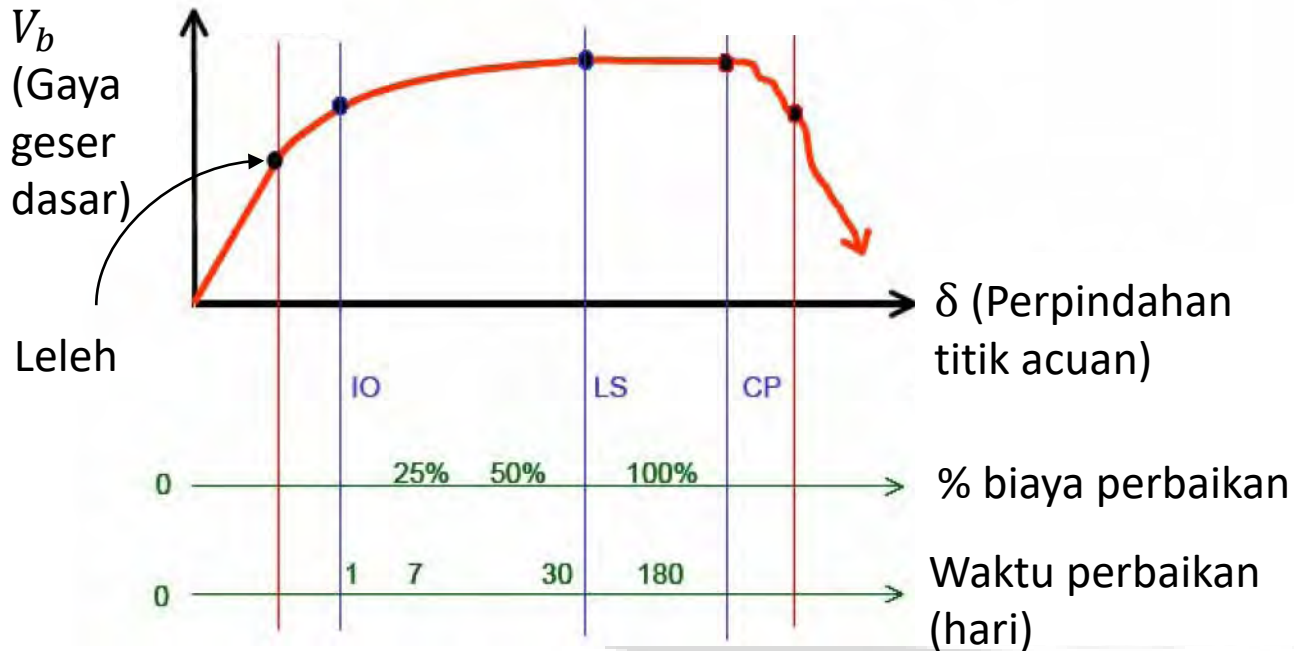
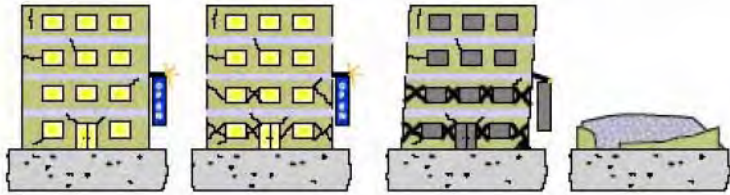
Nonlinear Static Analysis atau Pushover Analysis



Gambar 2 Roof drift dan roof drift ratio

Nonlinear Static Analysis atau Pushover Analysis

Batas kondisi elastis:



Gambar 3 Kurva kapasitas hubungan gaya geser dasar dengan perpindahan titik acuan

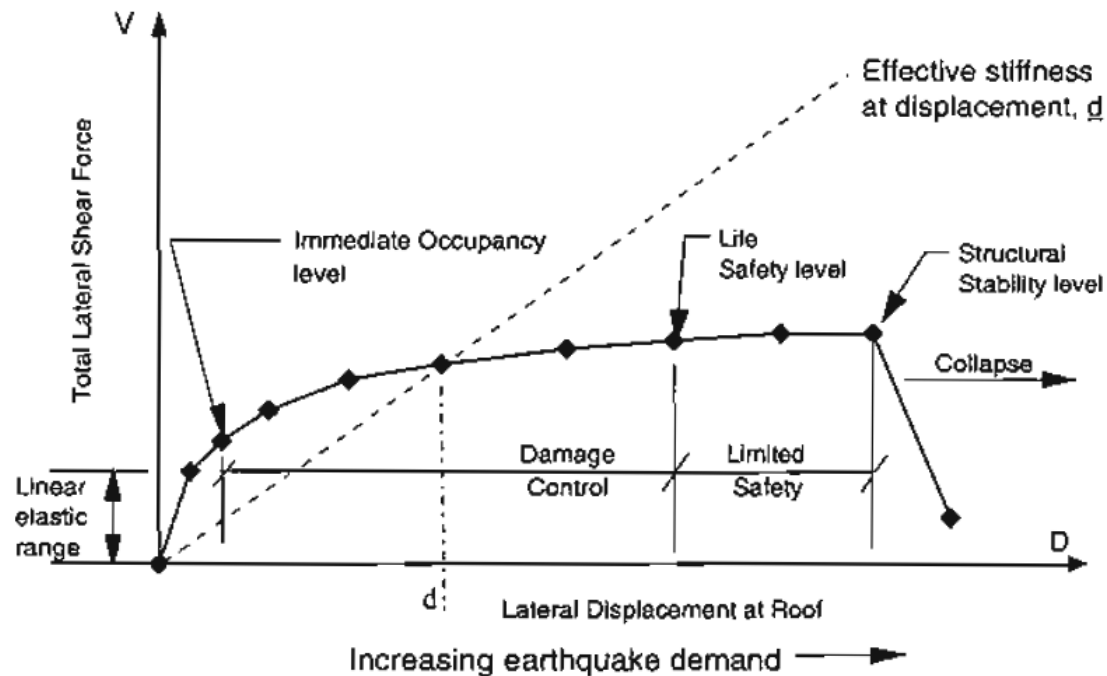
(Sumber: FEMA 273, 1997)

Level kinerja struktur menurut FEMA 273:

- **Immediate occupancy (IO)**, dapat segera digunakan): kerusakan relatif terbatas; struktur mempertahankan sebagian besar kekakuan awalnya dan sebagian besar kekuatannya.
- **Life safety (LS)**, keselamatan penghuni terjamin): kerusakan substansial telah terjadi pada struktur, dan mungkin telah kehilangan sejumlah besar kekakuan awalnya. Deformasi lateral tambahan sebelum keruntuhan telah terjadi.
- **Collapse prevention (CP)**, terhindar dari keruntuhan total): pada tingkat ini bangunan telah mengalami kerusakan ekstrim akibat deformasi lateral signifikan; struktur dapat mengalami ketidakstabilan dan keruntuhan geser dasar.

Nonlinear Static Analysis atau Pushover Analysis

Level kinerja struktur bangunan didefinisikan sebagai batasan tingkat kegagalan yang ditentukan oleh kerusakan fisik elemen struktural. Dalam *pushover analysis*, tingkat kinerja struktur bangunan dikategorikan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 4 Kurva kapasitas hubungan gaya geser dasar dengan perpindahan titik acuan

(Sumber: ATC-40 (1996), Fig. 6-2, p. 6-6)

Table 1. Buildings performance levels.

Non-structural Performance Levels	Structural Performance Levels					
	SP-1	SP-2	SP-3	SP-4	SP-5	SP-6
	IO	DC (Range)	LS	Limited Safety (Range)	SS	NC
NP-A	1-A	2-A	NR	NR	NR	NR
NP-B	1-B	2-B	3-B	NR	NR	NR
NP-C	1-C	2-C	3-C	4-C	5-C	6-C
NP-D	NR	2-D	3-D	4-D	5-D	6-D
NP-E	NR	NR	3-E	4-E	5-E	NA
NC					SS	

Sumber: ATC-40 (1996), Tabel 3-1, p. 3-2

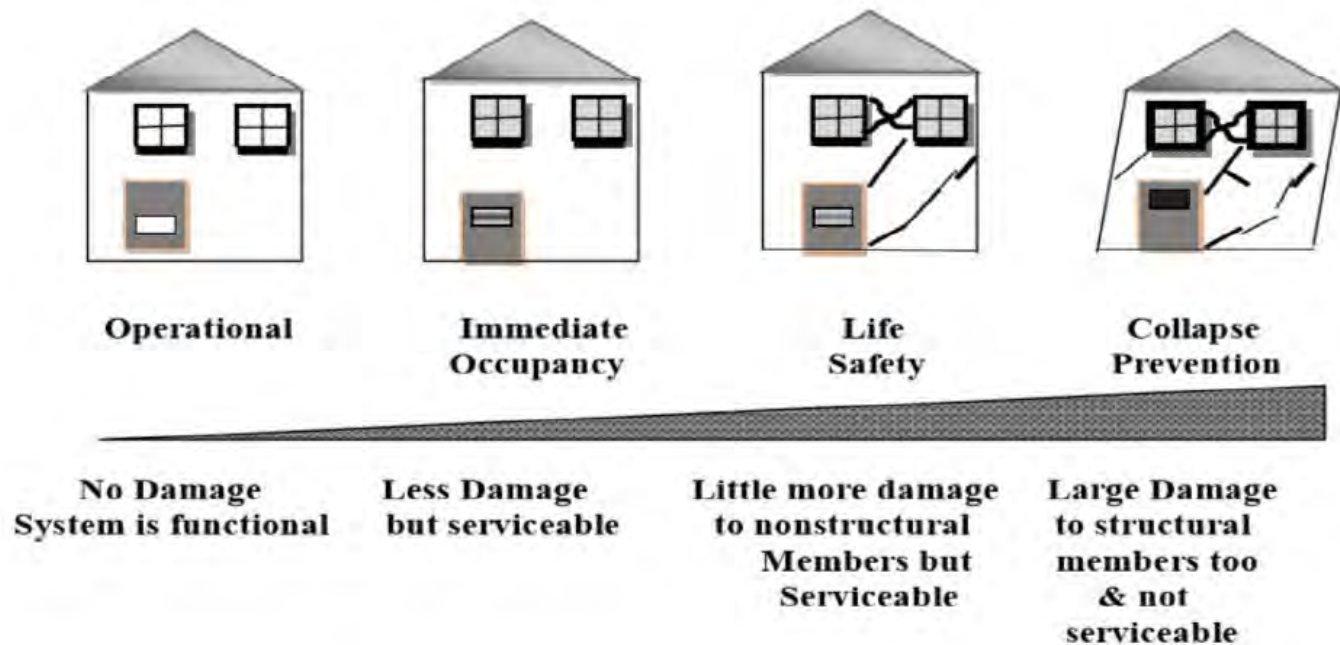
Notes:

- O : Operational
- IO : Immediate Occupancy
- DC : Damage Control
- LS : Life Safety
- RH : Reduced Hazards
- SS : Structural Stability
- NC : Not Considered
- NA : Not Applicable

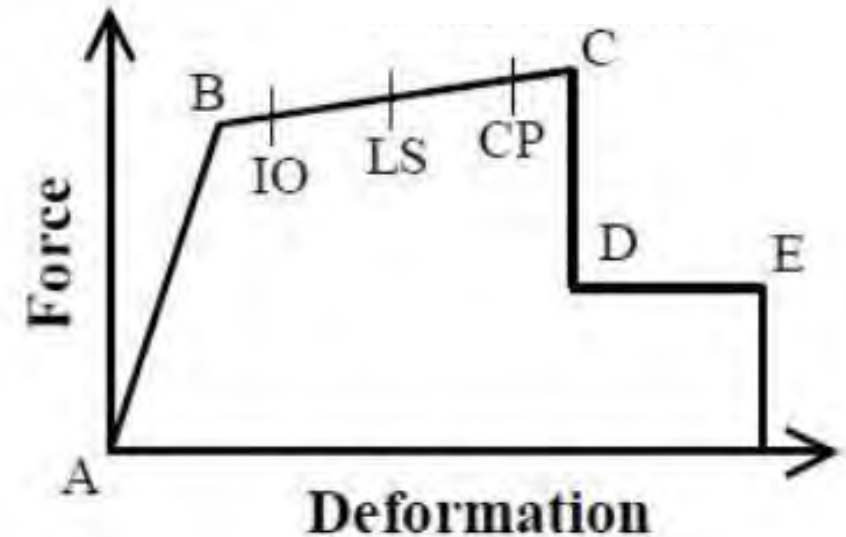
Legend

- Commonly ref. building performance levels (SP-NP)
- Other possible combination of SP-NP
- Not recommended combinations of SP-NP

Nonlinear Static Analysis atau Pushover Analysis



Level kinerja dan fungsi struktur bangunan
(Sumber: FEMA 273, 1997)



Kurva hubungan gaya geser dasar dengan perpindahan titik acuan pada program SAP
(Sumber: FEMA 356 (2000) Fig. C2-1)

Nonlinear Static Analysis atau *Pushover Analysis*

Batas deformasi sesuai level kinerja (*performance level*) struktur:

<i>Interstory Drift Limit</i>	<i>Performance Level</i>			
	<i>Immediate Occupancy (elastis)</i>	<i>Damage Control</i>	<i>Life Safety</i>	<i>Structural Stability</i>
<i>Max. Total drift (X_{max}/H)</i>	0,01	0,01 – 0,02	0,02	$0,33 \frac{V_i}{P_i}$
<i>Max. Inelastic drift (X_{max}/H)</i>	0,005	0,005 – 0,015	<i>no limit</i>	<i>no limit</i>

Sumber: ATC-40 (1996)

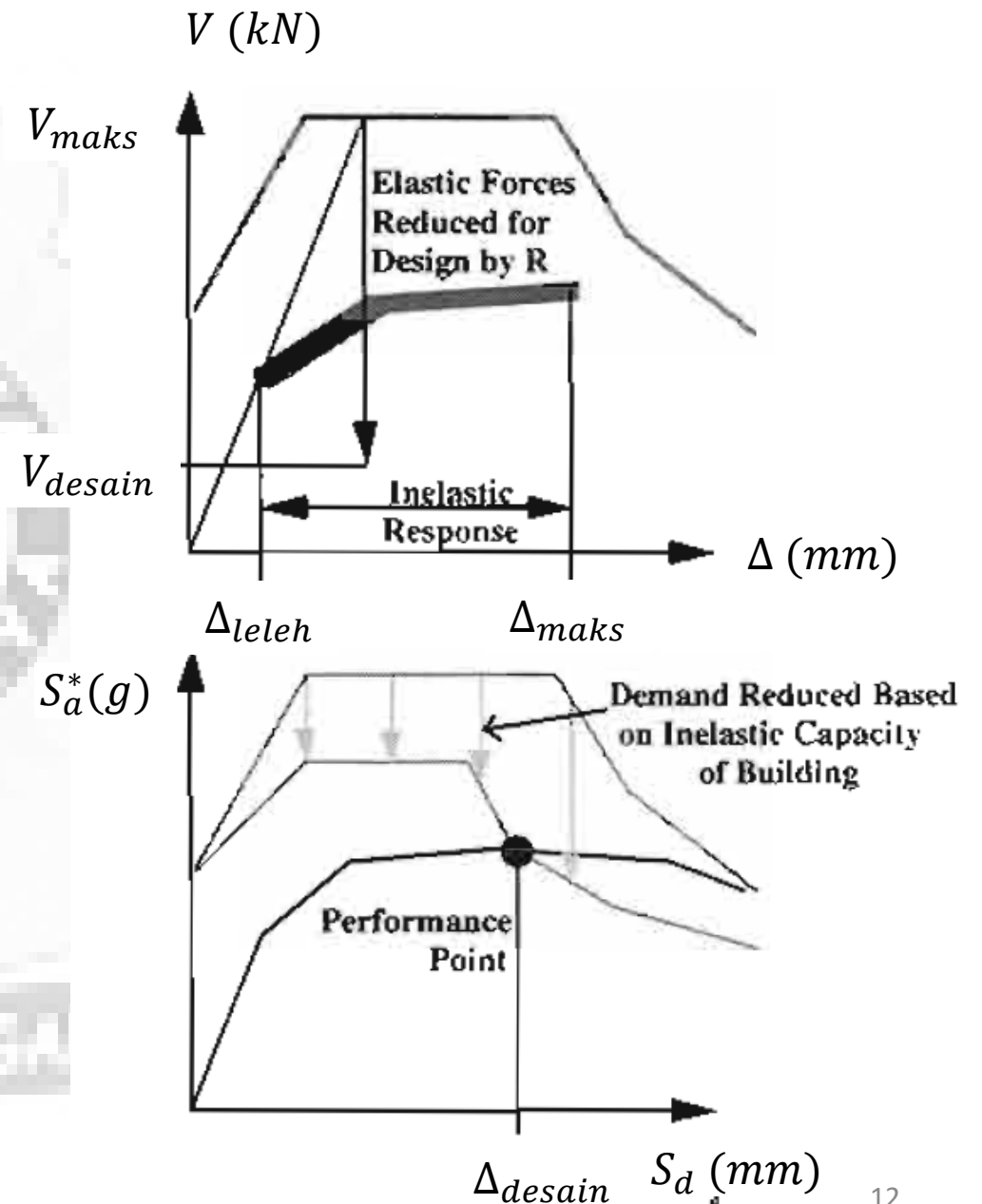
Performance Based Design

Traditional Code Basis

- Gaya gempa elastik direduksi untuk desain linear
- $V_{desain} = V_{maks}/R$
- Nilai R bervariasi, tergantung pada response inelastic tipe struktur
- Reduksi tergantung pada daktilitas yang diharapkan.
- Nilai daktilitas: $\mu = \Delta_{maks}/\Delta_{leleh}$

Performance Based Design

- Kebutuhan gempa inelastik tergantung pada kapasitas struktur gedung
- Perpotongan kurva kebutuhan (*demand*) dan kurva kapasitas (*capacity*) menghasilkan titik kinerja (*performance point*)
- Desain berdasarkan deformasi lateral Δ_{desain}



Performance Based Design

Tahap *performance based design*:

- ❖ Membuat **capacity curve** menggunakan **pushover analysis** dengan cara mengaplikasikan beban gempa lateral pada struktur bangunan sampai target perpindahan pada titik acuan di atap tercapai atau struktur mengalami keruntuhan
- ❖ Mengubah **capacity curve** hasil **pushover analysis** ($V-d$) menjadi **capacity spectrum** dengan **Acceleration-Displacement Response Spectra (ADRS) method**
- ❖ Mengubah kurva **Response Spectrum** menjadi **Demand Spectrum** (format ADRS)
- ❖ Dengan iterasi, diperoleh **performance point** (titik kinerja) yang mewakili level kinerja struktur

ILMU ALAT PENGABDIAN

Performance Based Design

Mengubah *Capacity Curve* menjadi *Capacity Spectrum*

Mengubah *capacity curve* menjadi *capacity spectrum* dengan metode *Acceleration-Displacement Response Spectra* (ADRS). Persamaan-persamaan yang digunakan:

$$MPF_1 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}) / g \right]}{\left[\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}^2) / g \right]} \quad (1)$$

$$\alpha_1 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}) / g \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^N (w_i / g) \right] \left[(w_i \phi_{i1}^2) / g \right]} \quad (2)$$

$$S_a = \frac{V_b / W}{\alpha_1} \quad (3)$$

$$S_d = \frac{X_{roof}}{MPF_1 \phi_{1,roof}} \quad (4)$$

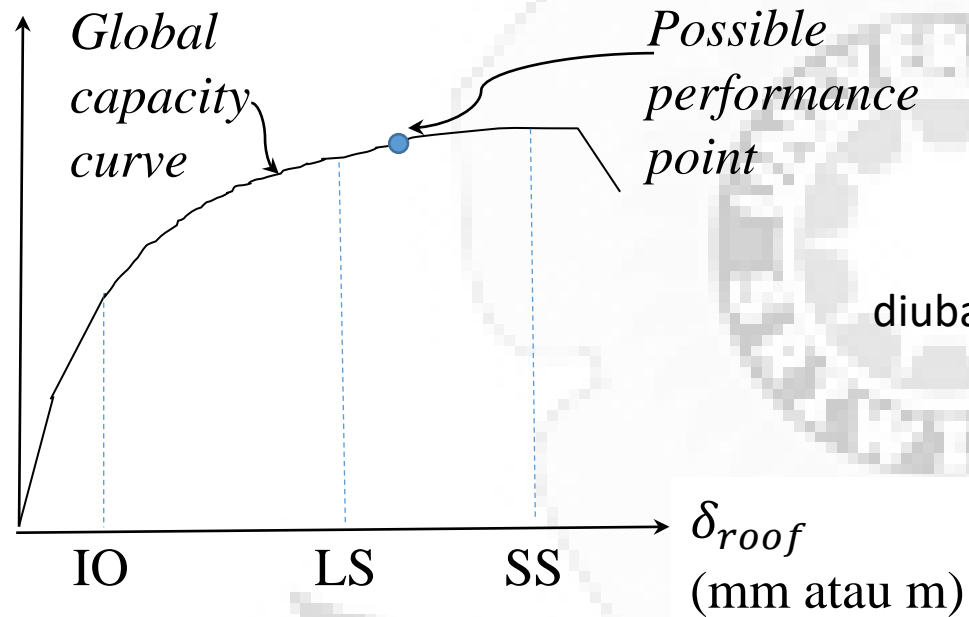
dengan:

- MPF_1 : *modal participation factor* pada mode alami ke-1
- α_1 : *modal mass coefficient* pada mode ke-1
- w_i / g : massa pada tingkat (*story*)-i
- $\phi_{1,i}$: amplitud mode ke-1 pada *story*-i
- $\phi_{1,roof}$: amplitud mode ke-1 di atap
- N : jumlah *story* (tingkat) bangunan
- V : gaya geser dasar (*base shear*)
- W : berat struktur (termasuk beban akibat berat sendiri dan beban hidup)
- X_{roof} : simpangan atap
- S_a : percepatan spektra
- S_d : simpangan spektra

Performance Based Design

Mengubah *Capacity Curve* menjadi *Capacity Spectrum*

Base Shear, V (kN)



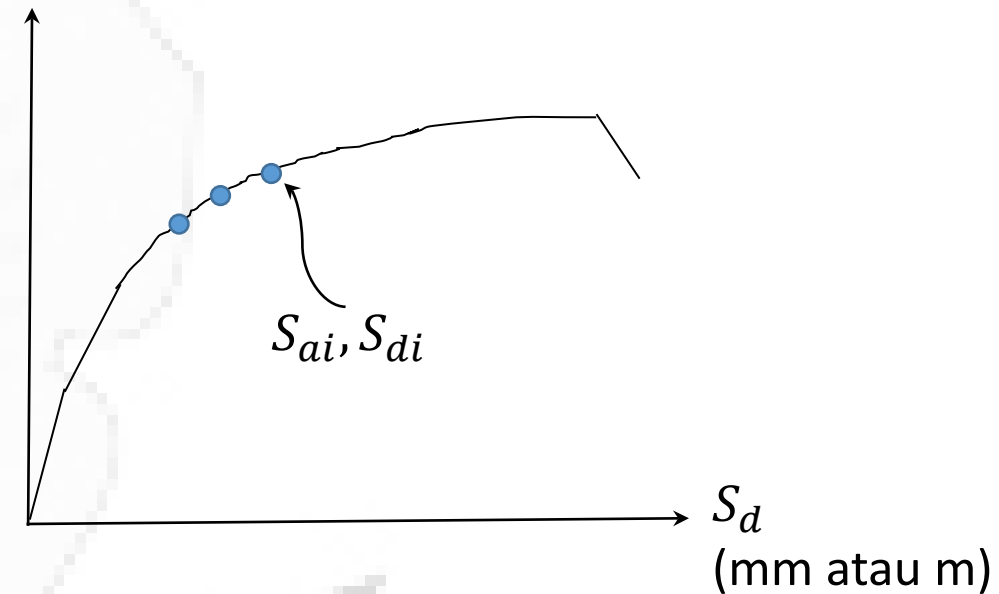
Capacity curve struktur bangunan

IO: *Immediate Occupancy* (dapat segera digunakan)

LS: *Life Safety* (keselamatan penghuni terjamin)

SS: *Structural Stability* (kestabilan struktur)

$$S_a^*(g) = \frac{S_{ai}}{g}$$



Capacity spectrum struktur bangunan

Performance Based Design

Mengubah *Response Spectrum* menjadi *Demand Spectrum* dalam format *ADRS*

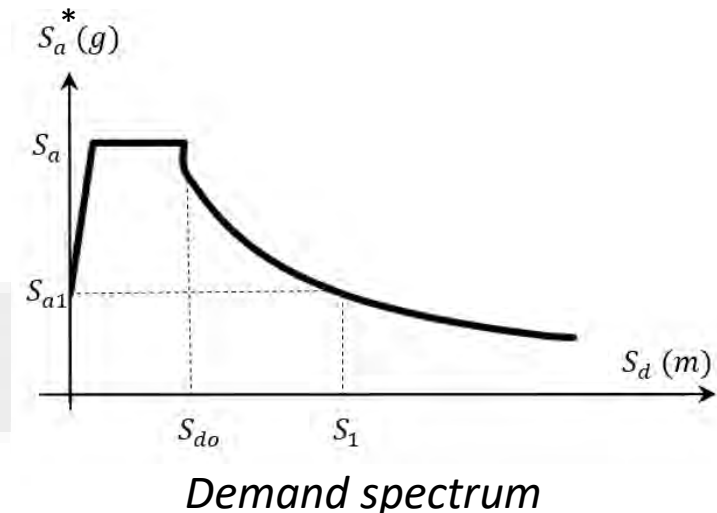
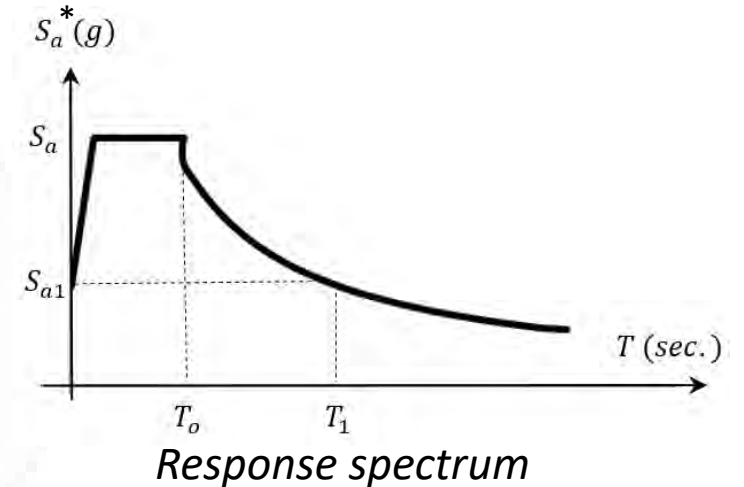
Response spectrum adalah kurva hubungan percepatan spektra (S_a) dan periode (T) gempa rencana di lokasi struktur bangunan. *Response spectrum* diubah menjadi *demand spectrum* format *Acceleration-Displacement Response Spectra* (ADRS) menggunakan persamaan 5-7.

$$S_{di} = \frac{T_i^2}{4\pi^2} S_{ai} g \quad (5)$$

$$S_{ai} g = \frac{2\pi}{T_i} S_v \quad (6)$$

$$S_{di} = \frac{T_i}{2\pi} S_v \quad (7)$$

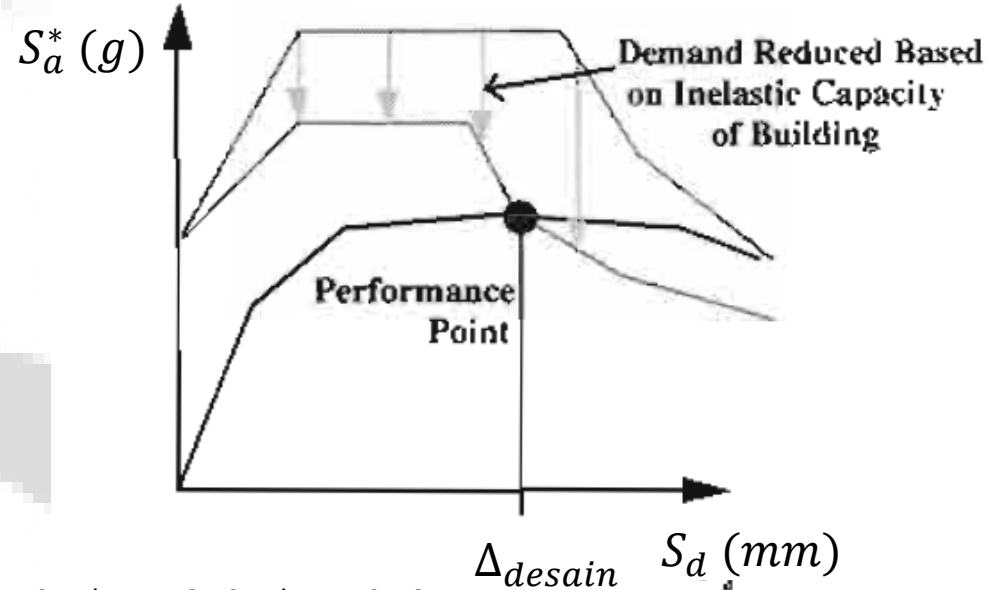
$$\text{Catatan: } S_{ai}^*(g) = S_{ai} / g \quad (8)$$



Performance Based Design

Performance point (titik kinerja)

Titik kinerja mewakili **tingkat kinerja struktur di bawah beban gempa maksimum**. Lokasi titik kinerja berada pada pertemuan *demand spectrum* dan *capacity curve*. Titik kinerja menghubungkan perpindahan maksimum atap (target perpindahan) yang terjadi karena gempa dengan percepatan seismik.

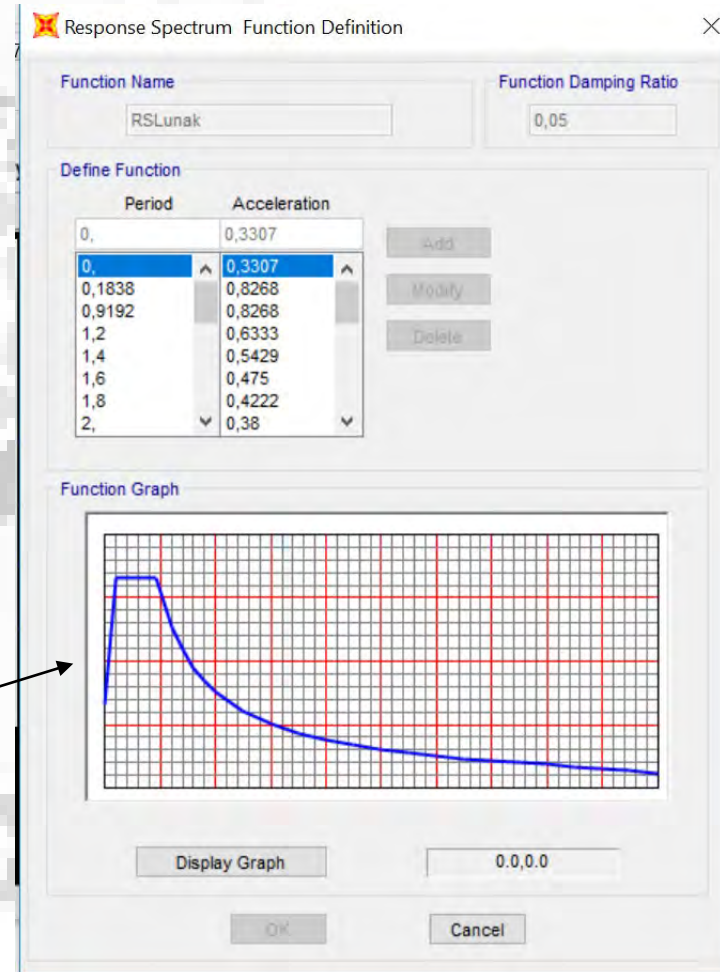
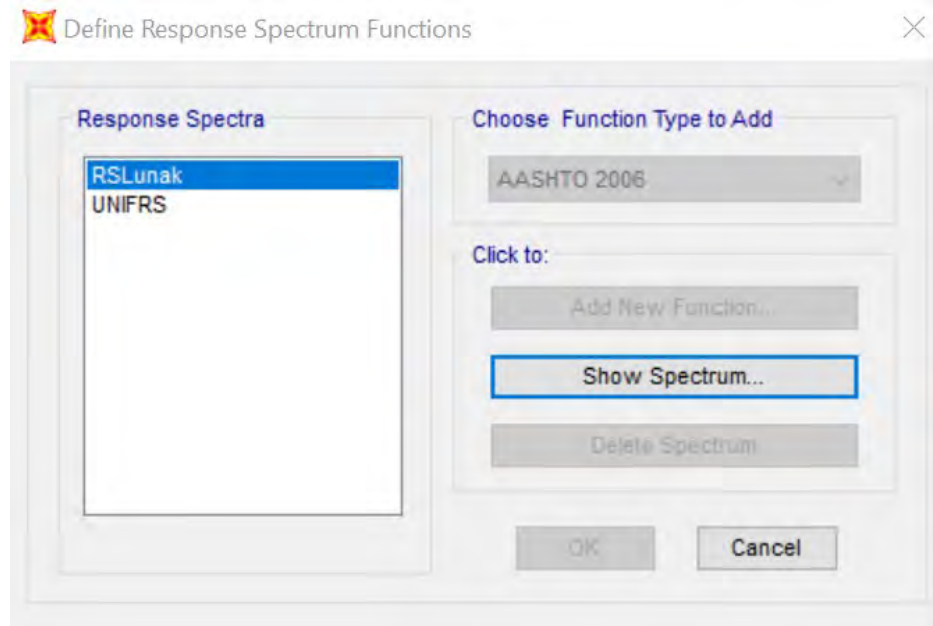


Sumber: ATC-40 vol. 1, p. 2-16



**CONTOH *PERFORMANCE BASED DESIGN*
UNTUK MEMPEROLEH *PERFORMANCE POINT***

Performance Based Design



Input program SAP:
respons spektra kondisi tanah lunak di Jakarta

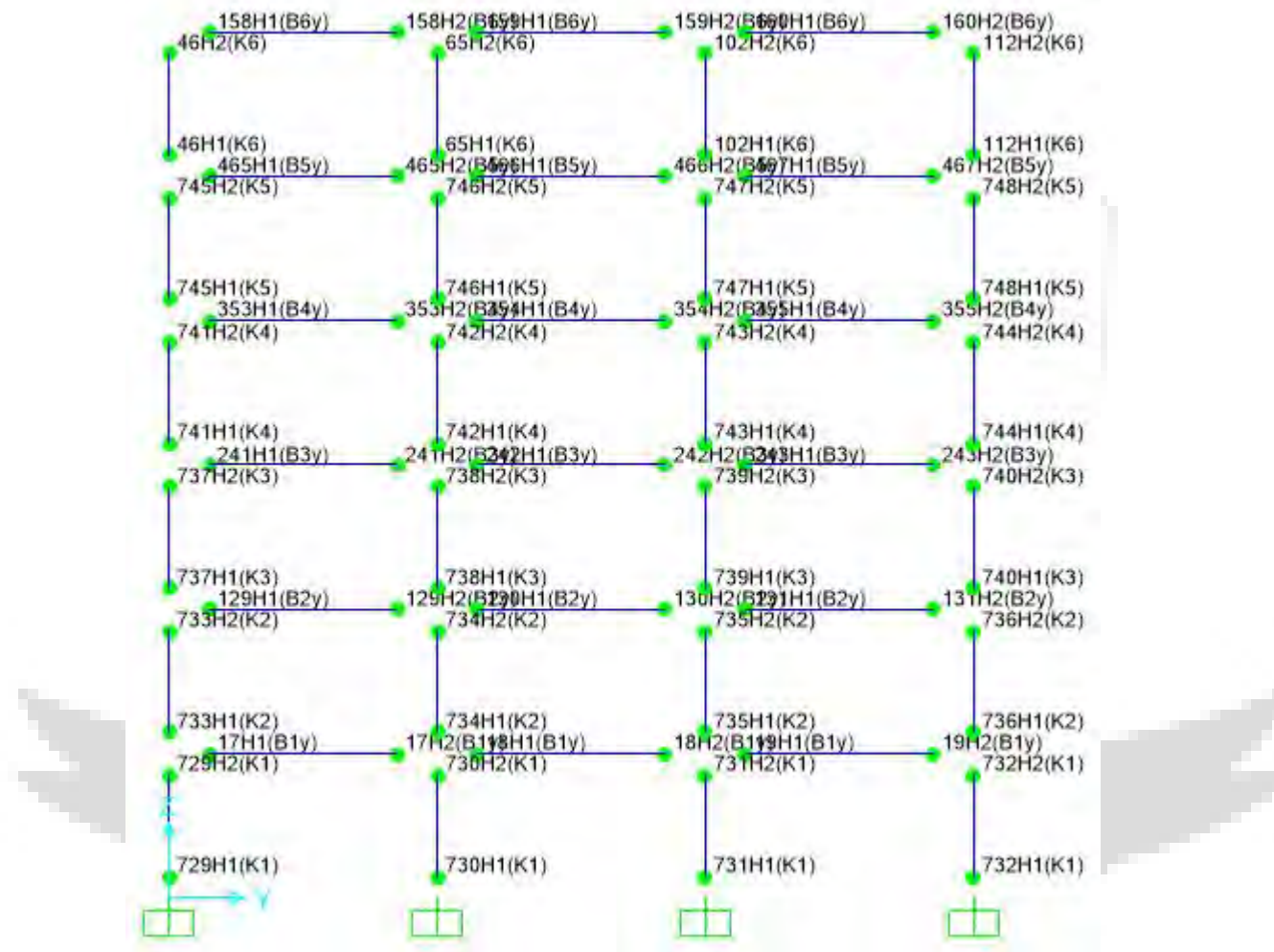
Performance Based Design



Input sendi plastis (lingkaran hijau) pada ujung balok dan kolom arah Sumbu X-Z

Nurjannah and Megantara, *unpublished manuscript*

Performance Based Design



Input sendi plastis (lingkaran hijau) pada ujung balok dan kolom arah Sumbu Y-Z

Performance Based Design

Input properti sendi-sendi plastis (*plastic hinges*) dapat dihitung secara manual atau menggunakan program khusus untuk menghitung momen leleh (M) dan kelengkungan atau *curvature* (φ), misalnya program **Response2000**.

Rasio nilai momen:momen leleh dan kelengkungan:kelengkungan leleh balok di-input ke dalam program SAP:

Catatan: *properti hinge* kolom menggunakan *default* SAP.

Frame Hinge Property Data for 6H1 - Moment M3

Edit

Displacement Control Parameters

Point	Moment/SF	Rotation/SF
E	-0.2	-6
D-	-0.2	-4
C-	-1.12	-4
B	-1	0
A	0	0
B	1	0
C	1.12	4
D	0.2	4
E	0.2	6

Symmetric

Type

Moment - Rotation

Moment - Curvature

Hinge Length

Relative Length

Hysteresis Type And Parameters

Hysteresis Type

No Parameters Are Required For This Hysteresis Type

Load Carrying Capacity Beyond Point E

Drops To Zero

Is Extrapolated

Scaling for Moment and Rotation

Use Yield Moment

Moment SF Positive Negative

Use Yield Rotation (Steel Objects Only)

Rotation SF Positive Negative

Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF)

Immediate Occupancy

Positive Negative

Life Safety

Positive Negative

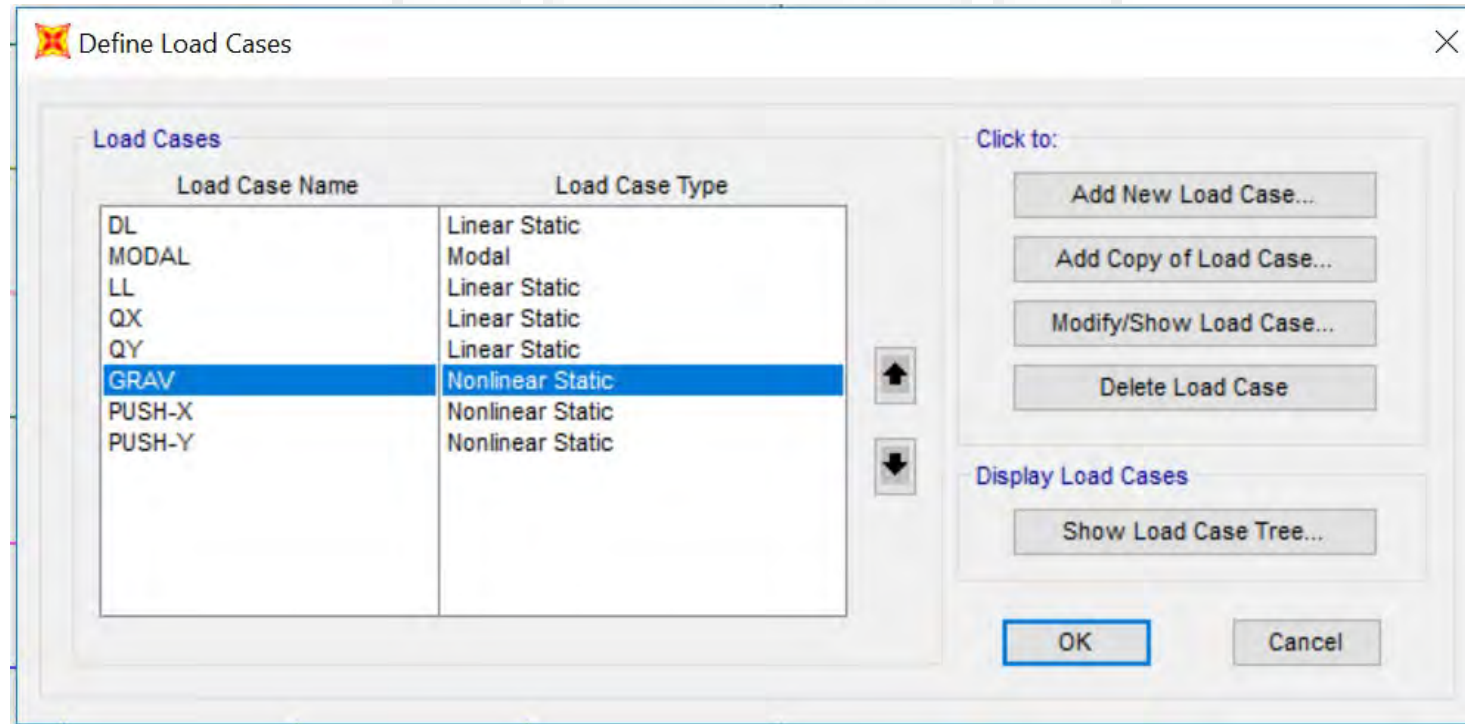
Collapse Prevention

Positive Negative

Show Acceptance Criteria on Plot

OK Cancel

Performance Based Design



Input beban gravitasi

Performance Based Design

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: GRAV

Initial Conditions: Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Modal Load Case: All Modal Loads Applied Use Modes from Case (MODAL)

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	DL	1,
Load Pattern	DL	1,
Load Pattern	LL	0,25

Load Application Control for Nonlinear Static Analysis

Load Application Control: Full Load

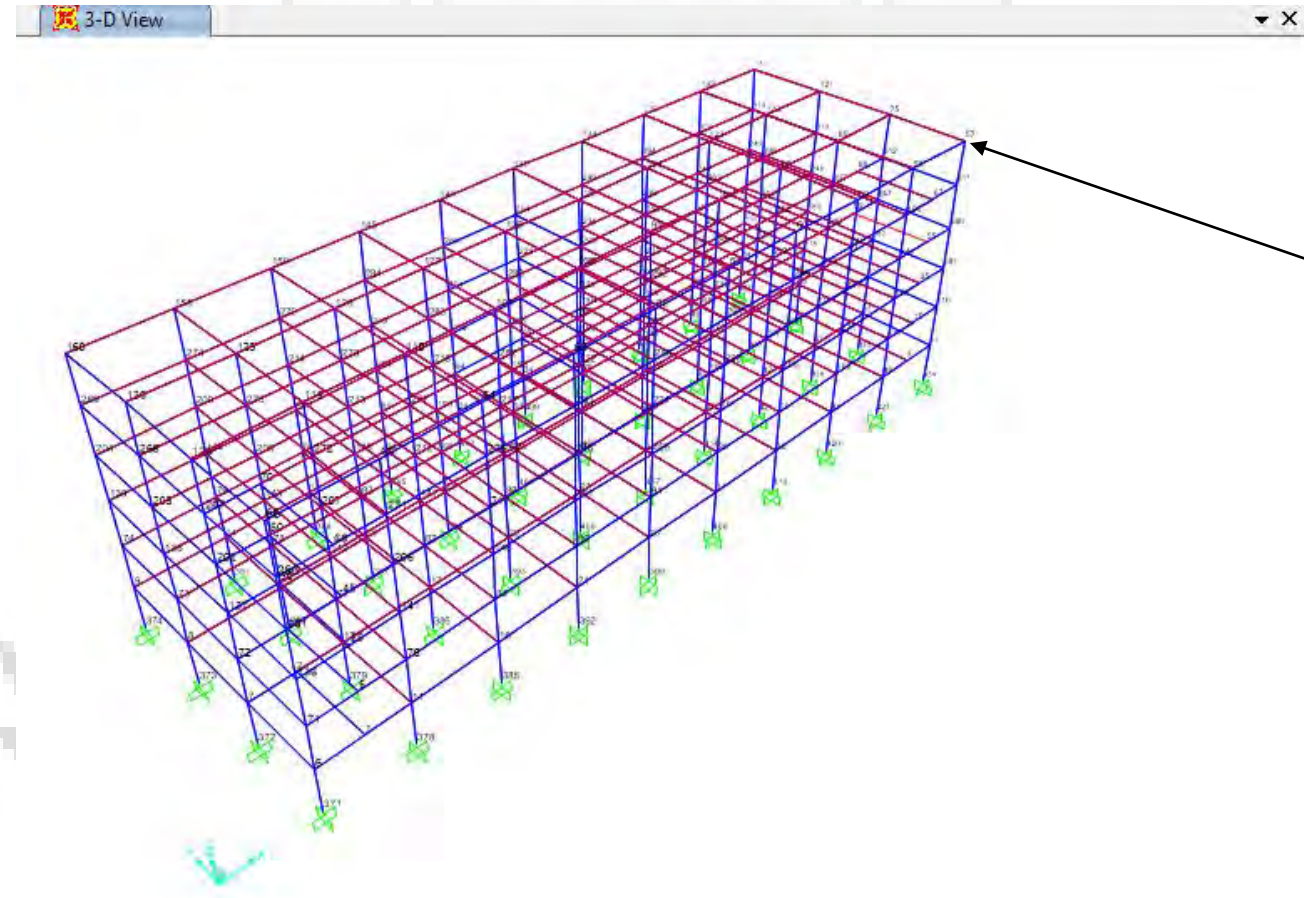
Control Displacement: Use Conjugate Displacement

Monitored Displacement: DOF U1 at Joint 57

Input beban gravitasi: 1 DL + 0,25 LL (ATC-40, 1996)

Nomor titik acuan: 57

Performance Based Design



Titik no. 57 sebagai titik acuan yang dimonitor perpindahannya sampai mencapai target perpindahan

Nurjannah and Megantara, *unpublished manuscript*

Performance Based Design

The image shows three overlapping software dialog boxes from a finite element analysis program. The leftmost dialog, 'Load Case Data - Nonlinear Static', has 'PUSH-X' as the Load Case Name and 'Continue from State at End of Nonlinear Case' selected under Initial Conditions. The 'Loads Applied' table is highlighted with a red box:

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

The middle dialog, 'Load Application Control for Nonlinear Static Analysis', has 'Displacement Control' selected under Load Application Control and 'Use Conjugate Displacement' selected under Control Displacement. The 'Monitored Displacement' section has 'DOF' selected, 'U1' in the dropdown, and '57' in the 'at Joint' field. The rightmost dialog, 'Results Saved for Nonlinear Static Load Cases', has 'Multiple States' selected under Results Saved, with 'Minimum Number of Saved States' set to 10 and 'Maximum Number of Saved States' set to 100. A black arrow points from the 'UX' load name in the table to the 'U1' dropdown in the middle dialog.

Displacement UX yang diaplikasikan ke titik no. 57 di atap

Performance Based Design

The image shows three overlapping dialog boxes in ANSYS software:

- Load Case Data - Nonlinear Static:** Shows 'Load Case Name' as PUSH-Y, 'Load Case Type' as Static, and 'Analysis Type' as Nonlinear. The 'Loads Applied' table is highlighted with a red box:

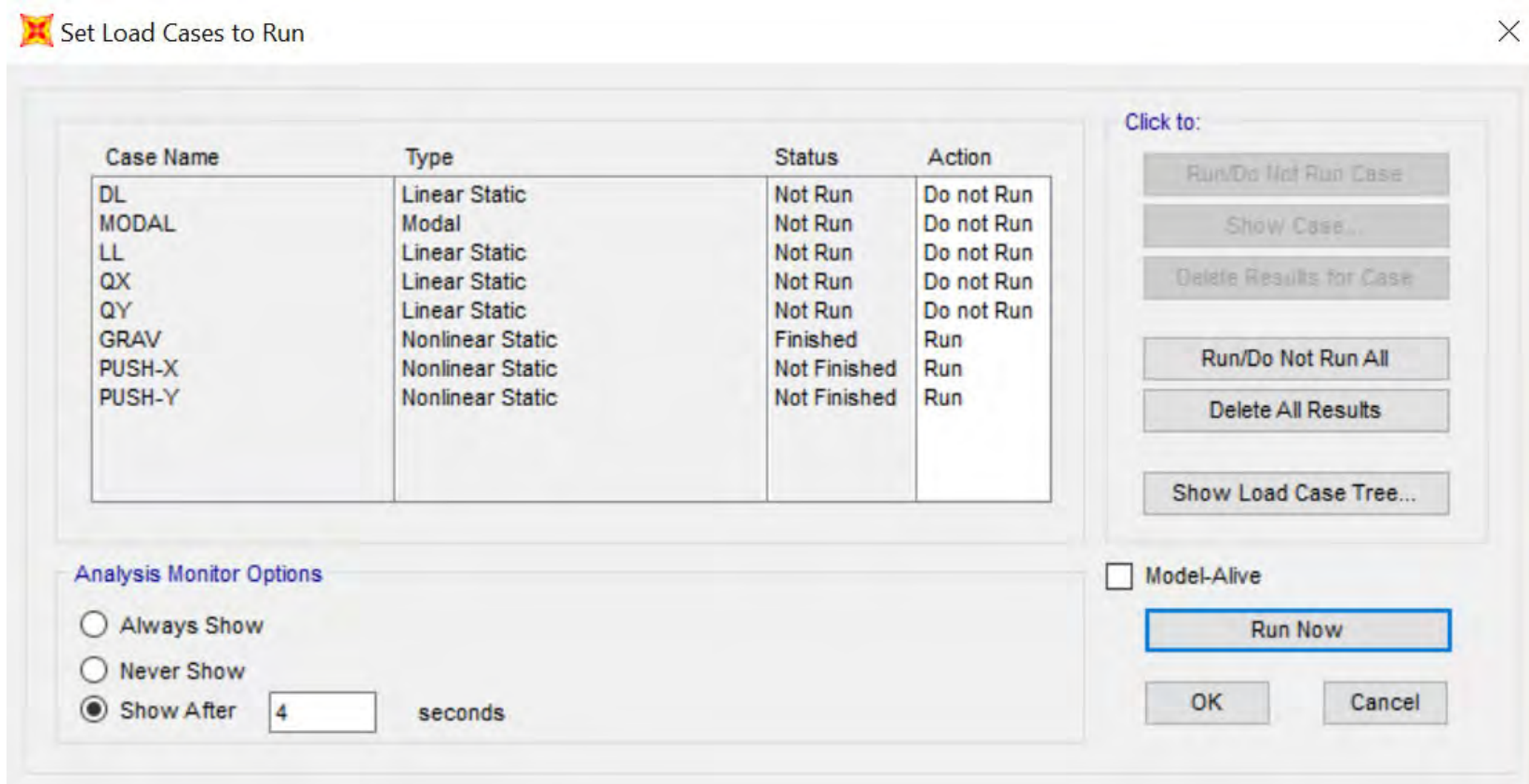
Load Type	Load Name	Scale Factor
Accel	UY	-1
Accel	UY	-1

- Load Application Control for Nonlinear Static Analysis:** Shows 'Load Application Control' as Displacement Control, 'Control Displacement' as Use Conjugate Displacement, and 'Monitored Displacement' as DOF U2 at Joint 57.
- Results Saved for Nonlinear Static Load Cases:** Shows 'Results Saved' as Multiple States, 'Minimum Number of Saved States' as 10, and 'Maximum Number of Saved States' as 100.

An arrow points from the 'UY' entry in the 'Loads Applied' table to the '57' in the 'Monitored Displacement' field of the second dialog.

Displacement UY yang diaplikasikan ke titik no. 57 di atap

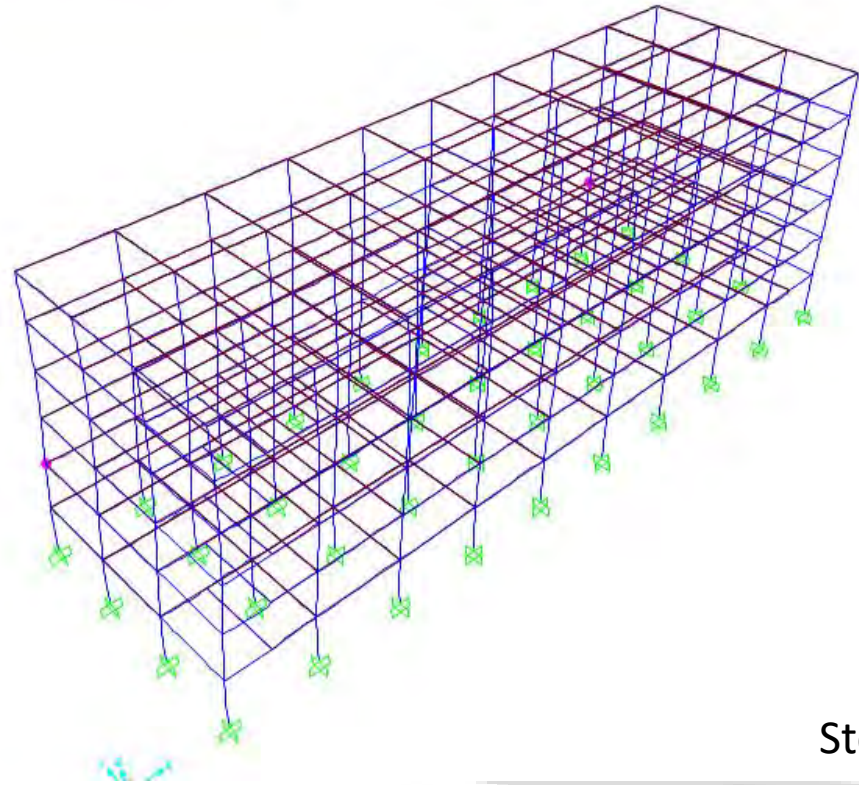
Performance Based Design



Load case yang di-run: beban gravitasi (GRAV), pushover arah X (PUSH-X), dan pushover arah Y (PUSH-Y)

Performance Based Design

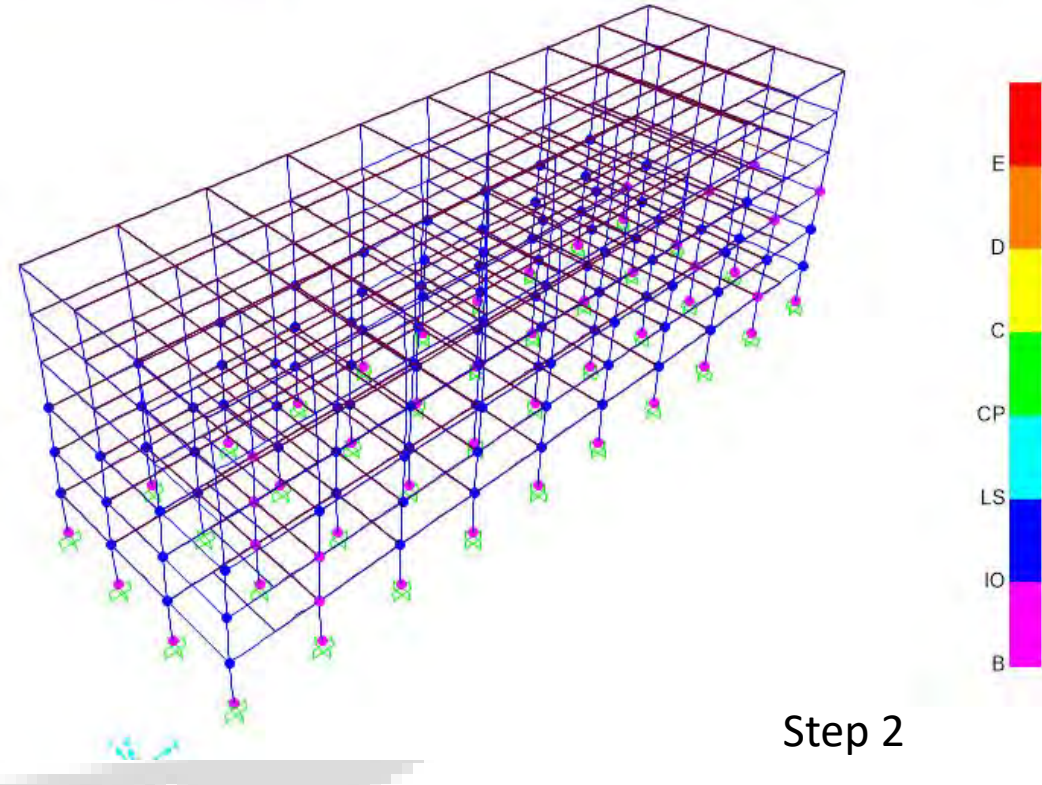
Deformed Shape (PUSH-X) - Step 1



Step 1

Beberapa sendi plastis (*plastic hinge*) mulai masuk kategori *Immediate Occupancy* (IO)

Deformed Shape (PUSH-X) - Step 2

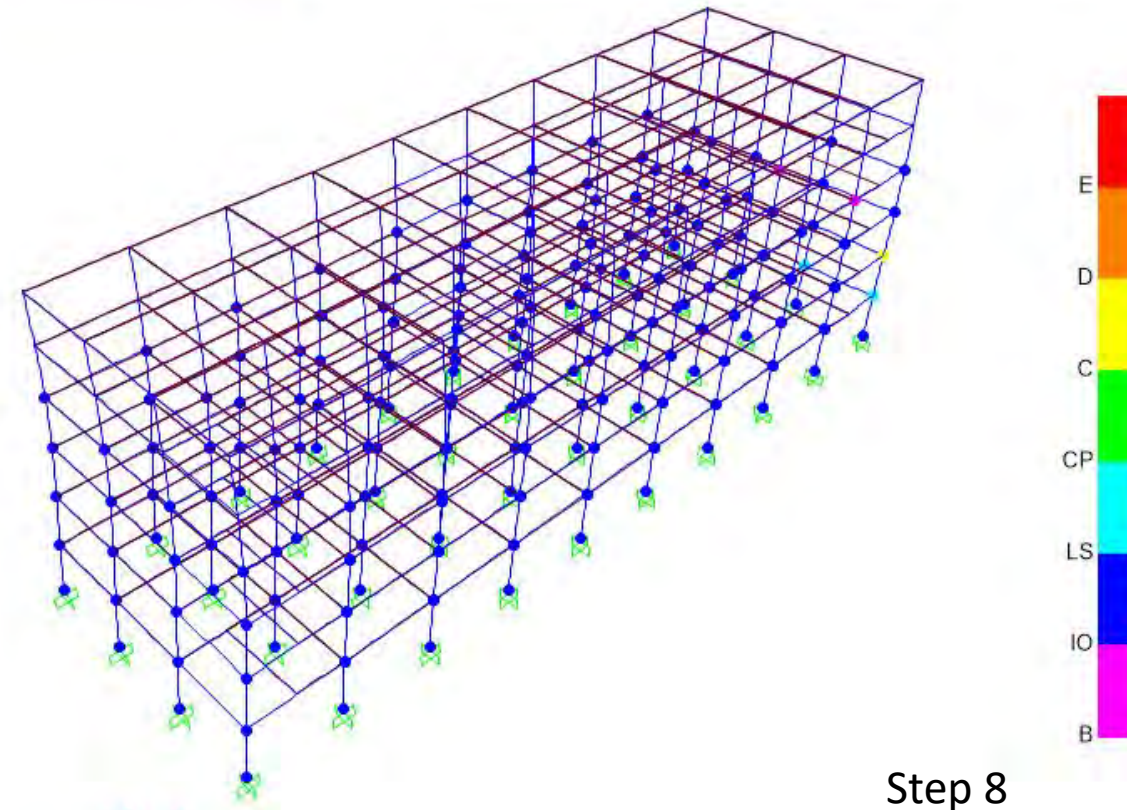
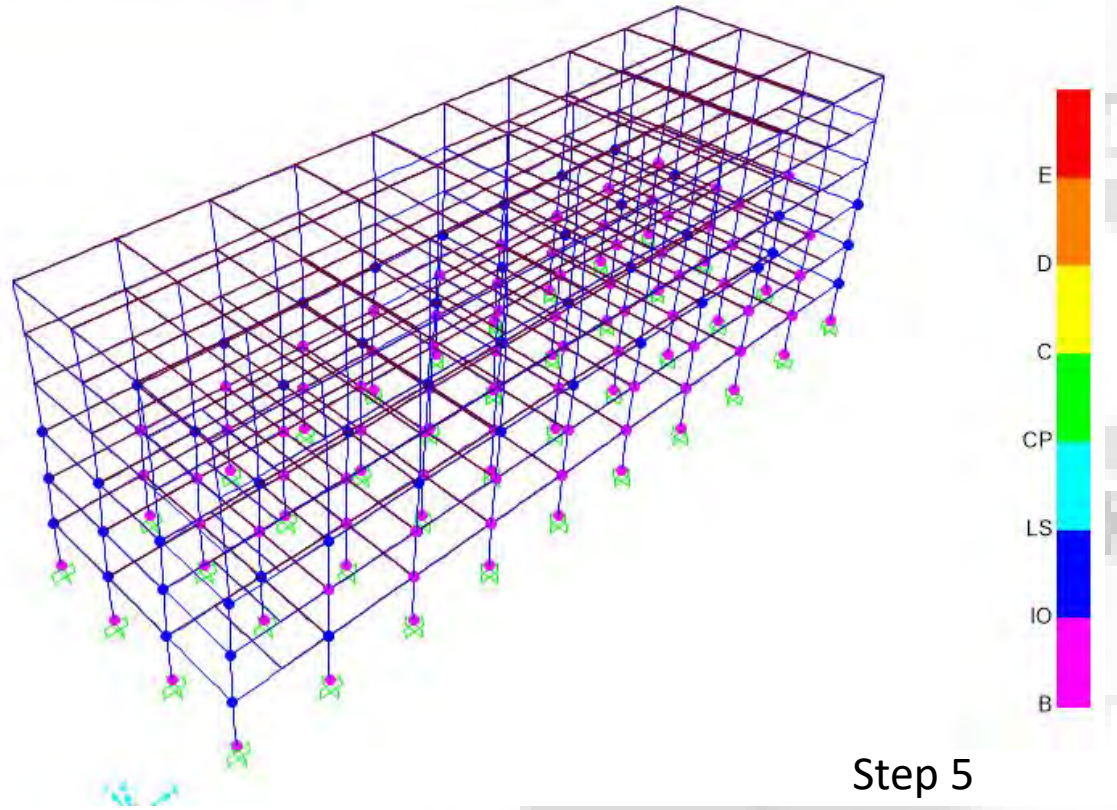


Step 2

Jumlah sendi plastis (*plastic hinge*) yang masuk kategori *Immediate Occupancy* (IO) semakin banyak

Nurjannah and Megantara, *unpublished manuscript*

Performance Based Design

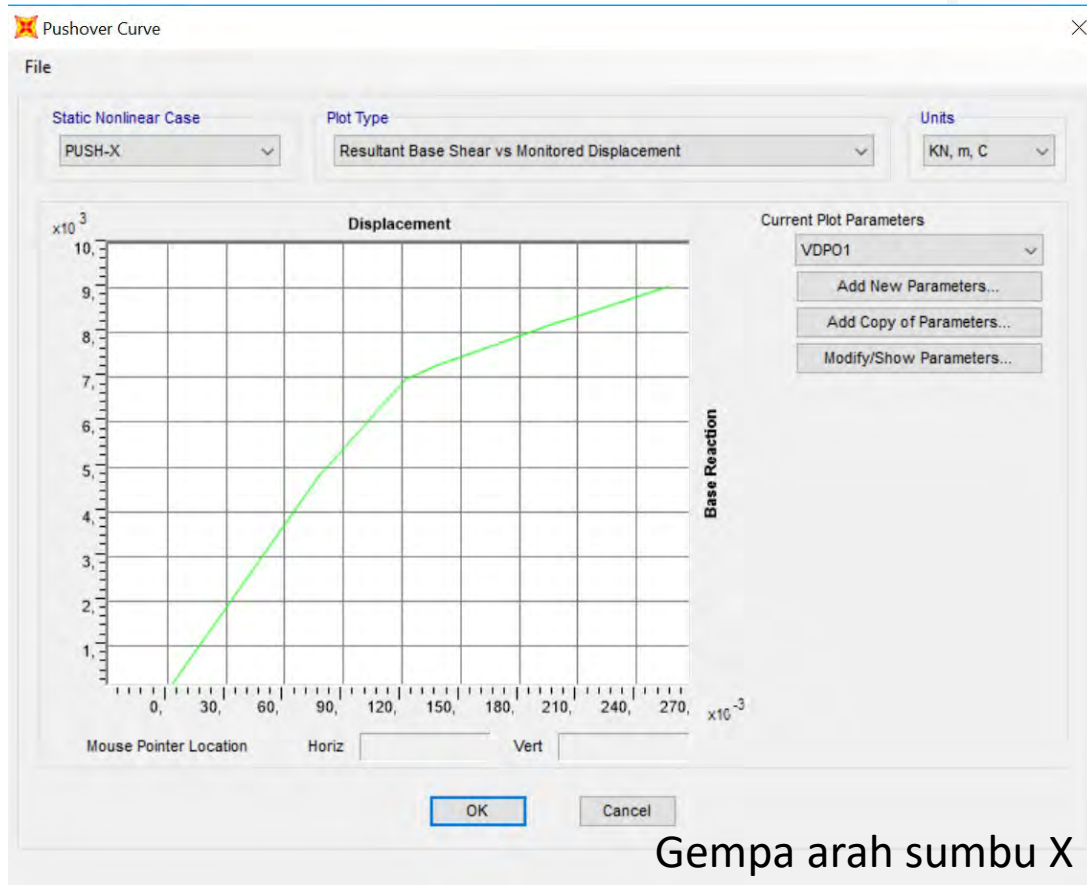


Terdapat sendi plastis lain yang baru masuk kondisi *Immediate Occupancy* (IO)

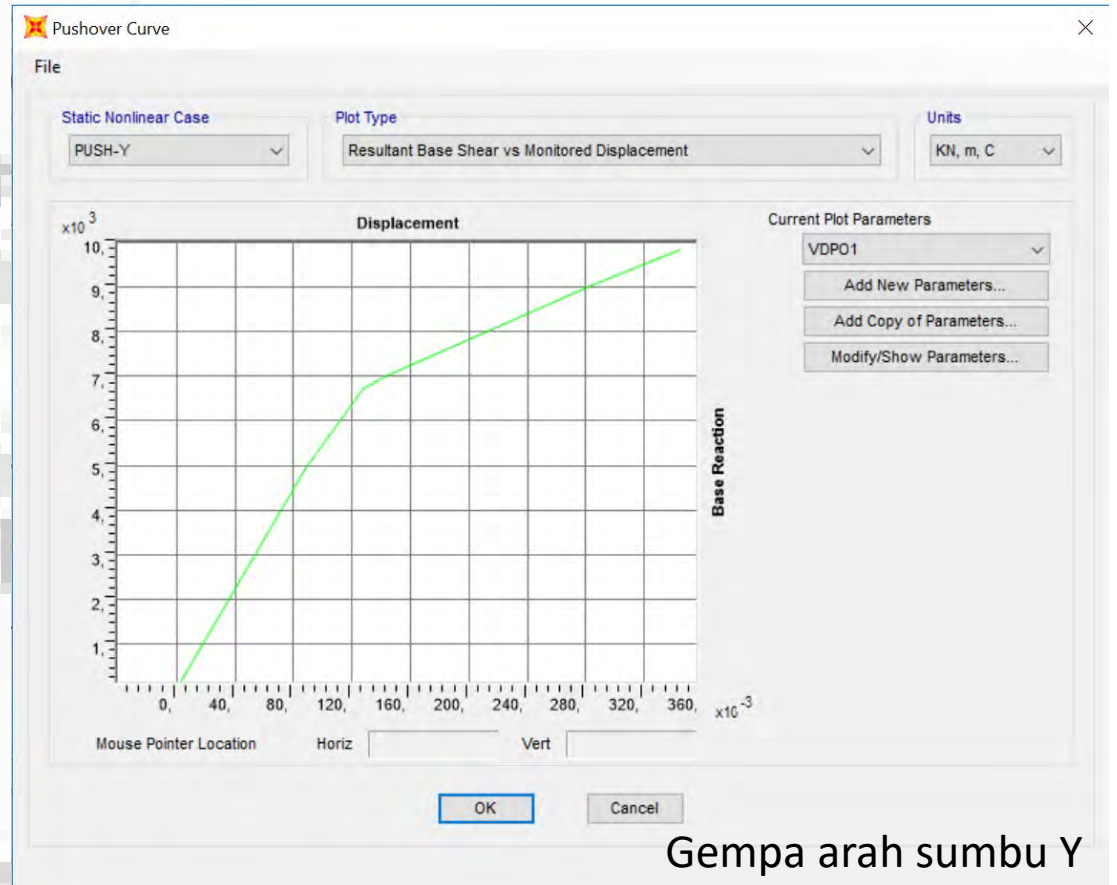
Kondisi akhir: *Life Safety* (LS) pada beberapa sendi plastis

Nurjannah and Megantara, *unpublished manuscript*

Performance Based Design



Gempa arah sumbu X

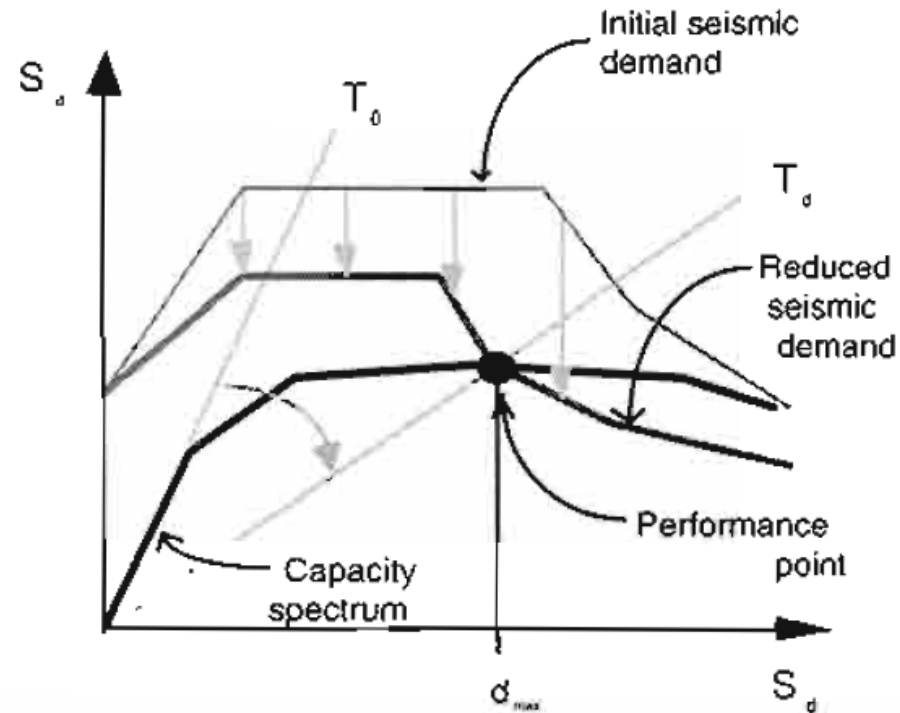


Gempa arah sumbu Y

Kurva kapasitas ($V-\delta$) hasil analisis *pushover*

Nurjannah and Megantara, *unpublished manuscript*

Performance Based Design

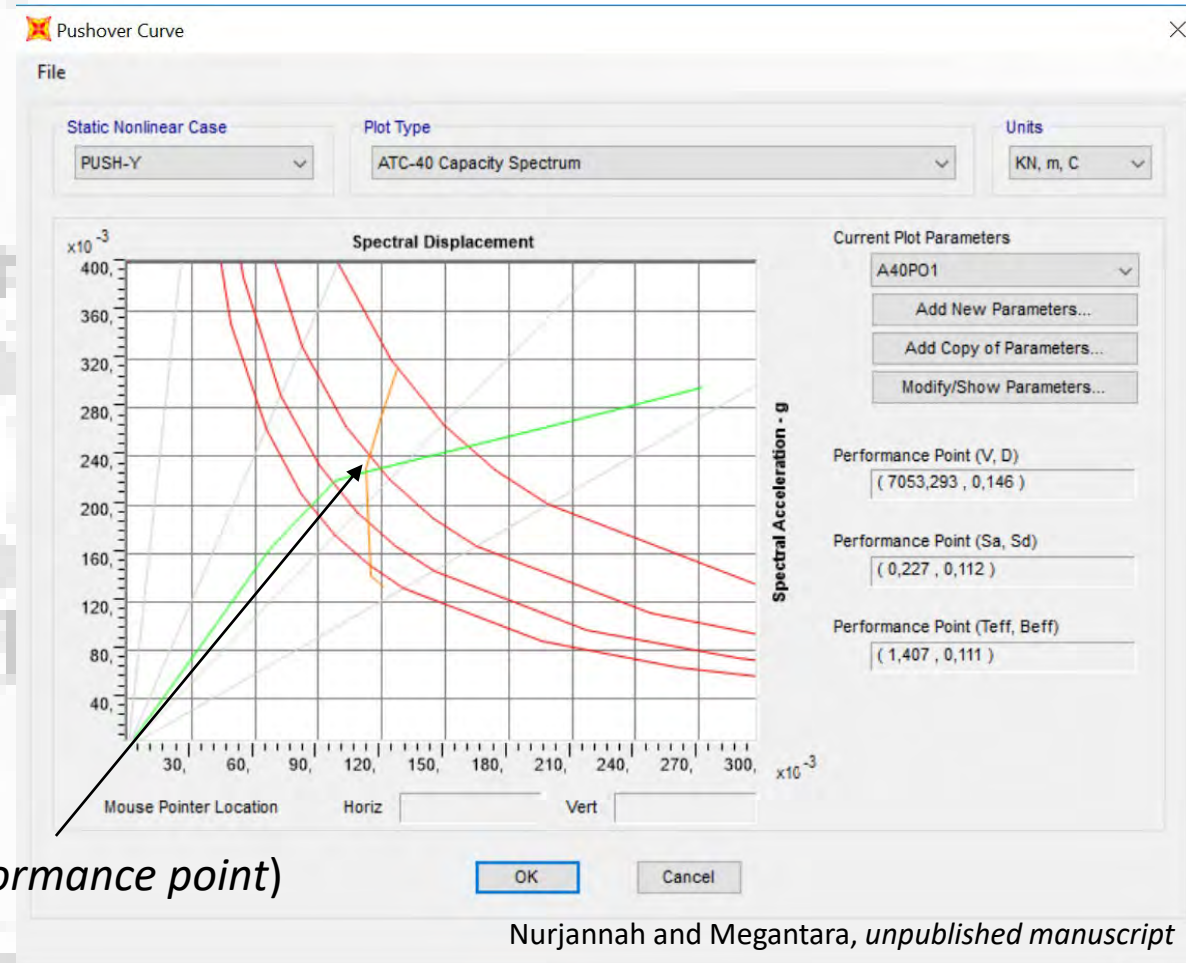
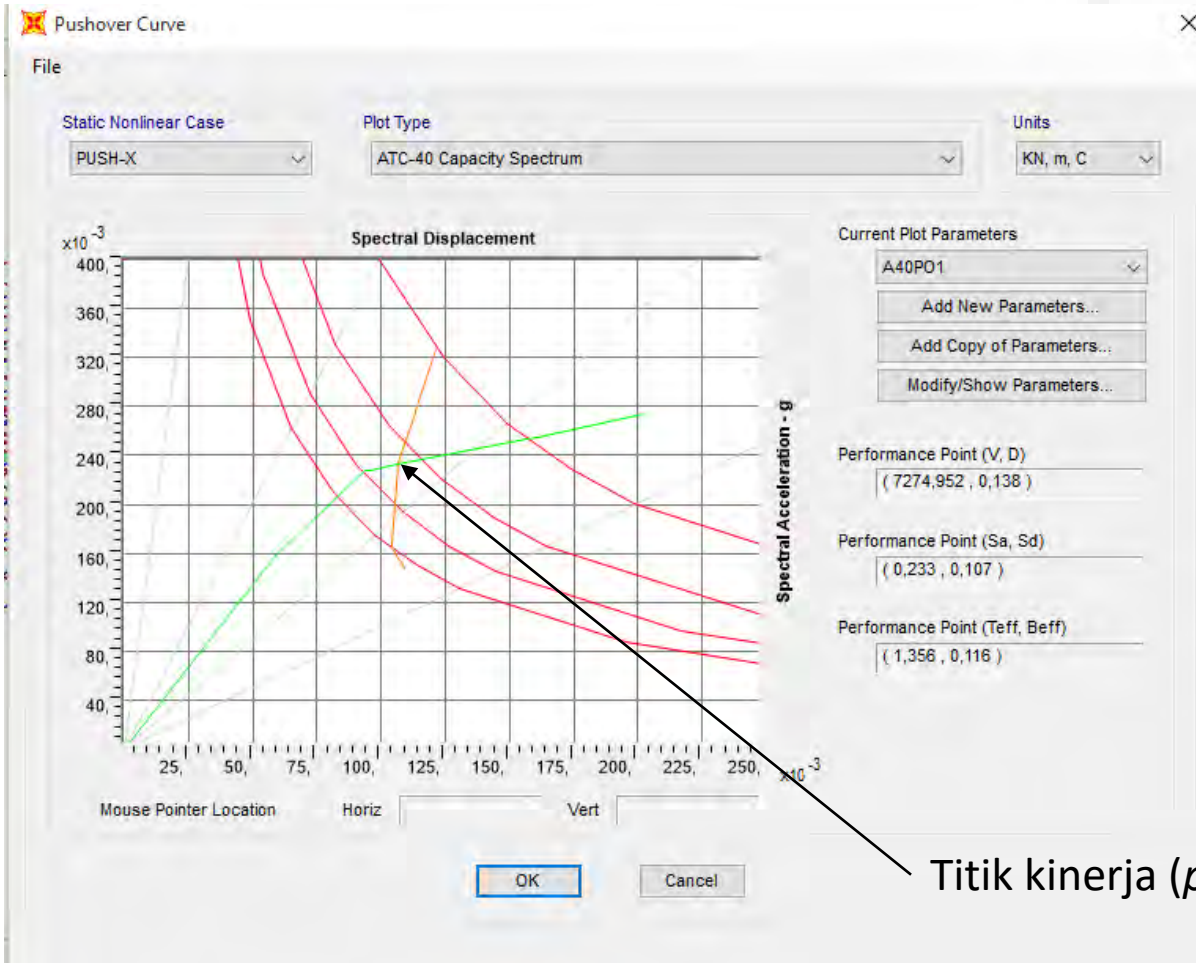


At the performance point, capacity and demand are equal.

The maximum displacement implies a unique damage state for the building related directly to a specific earthquake or intensity of ground shaking. The damage state comprises deformations for all elements in the structure. Comparison with acceptability criteria for the desired performance goal leads to the identification of deficiencies for individual elements.

Sumber: ATC-40 vol. 1, p. 2-18

Performance Based Design

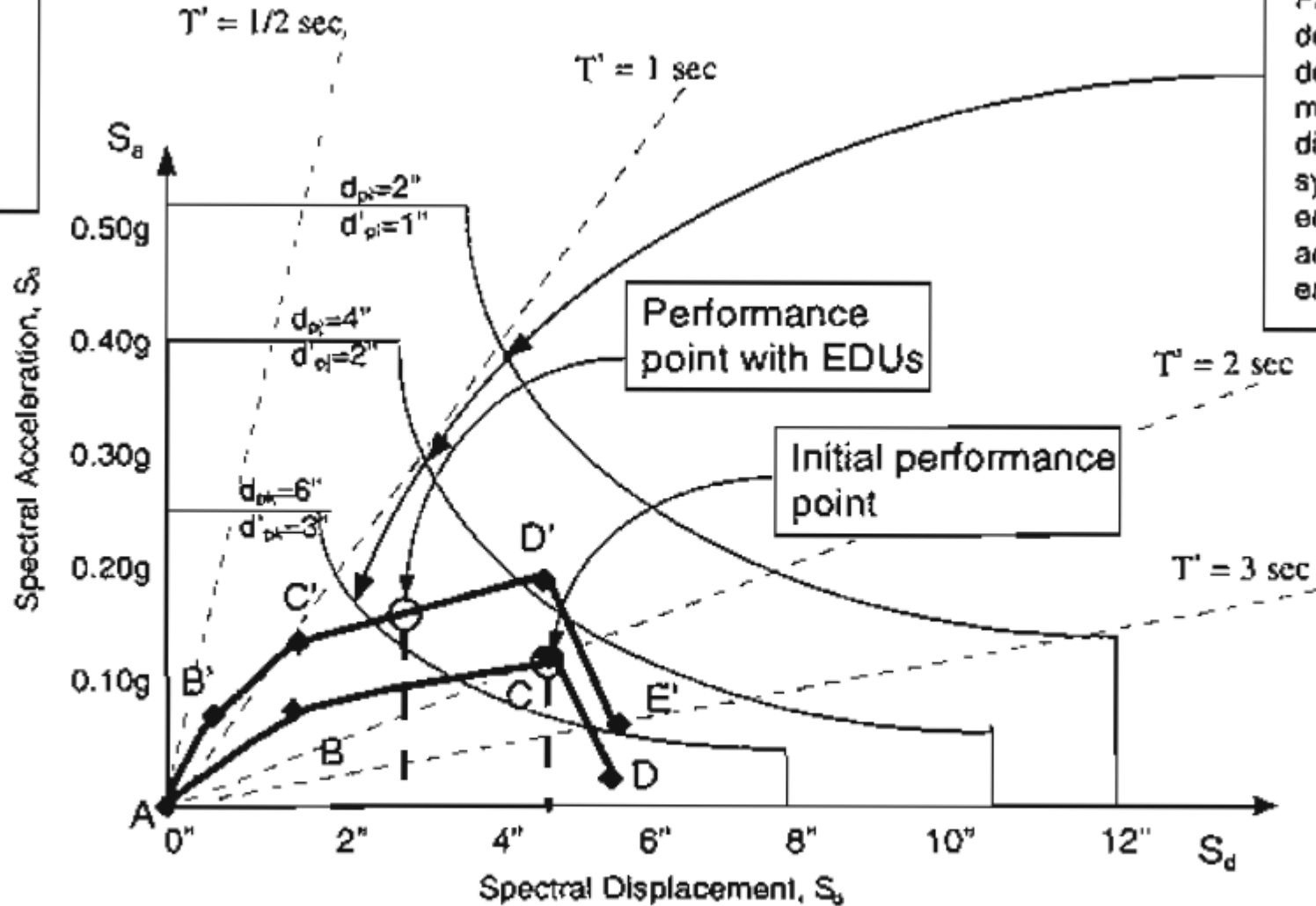


Titik kinerja (*performance point*)

Nurjannah and Megantara, *unpublished manuscript*

Perbandingan *Capacity Spectrum* struktur dengan *Demand Spectrum* gempa rencana untuk menentukan titik kinerja (*performance point*) akibat *pushover* arah X (PUSH-X), dan *pushover* arah Y (PUSH-Y)

NOTE: The family of reduced demand spectra reflect the effect of damping on response. See Chapter 8



Family of reduced demand spectra depending on maximum displacement d' for system without energy dissipators and d' for system with energy dissipators

Figure 6-9. Effect of Enhanced Damping on Building Performance



MATERI LEBIH LENGKAP TENTANG *PERFORMANCE BASED DESIGN*
TERDAPAT DI KULIAH S2:

<http://bit.ly/S2PBD>

Referensi

- American Society of Civil Engineers (ASCE) and Federal Emergency Management Agency (FEMA), (1997): *FEMA 273 NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA, Washington, D.C.
- American Society of Civil Engineers (ASCE) and Federal Emergency Management Agency (FEMA), (2000): *FEMA 356 Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA, Washington, D.C.
- Applied Technology Council (ATC), (1996): *ATC-40 Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, Volume 1, ATC, Sacramento, CA.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN), (2012): *SNI 1726-2012 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung*, BSN, Jakarta, Indonesia.
- Chopra, A.K., (1995): *Dynamics of Structures: Theory and Application to Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Inc., New-Jersey.
- Nurjannah, S.A. dan Megantara, Y., (2018): *The Behavior of Six-story Frame and Shear Walled Buildings in an Earthquake Zone*, *unpublished manuscript*.

ILMU ALAT PENGABDIAN