

TUGAS AKHIR

STUDI KEANDALAN STRUKTUR GEDUNG TINGGI TIDAK BERATURAN MENGGUNAKAN *PUSHOVER ANALYSIS* PADA TANAH MEDIUM



DISUSUN OLEH :

ULFA NURDIANTI

D111 08 304

JURUSAN SIPIL FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2013



KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS HASANUDDIN FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK SIPIL

KAMPUS TAMALANREA TELP. (0411) 587 636 FAX. (0411) 580 505 MAKASSAR 90245
E-mail : sipil.unhas@yahoo.co.id

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S1 Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.

Judul : " *Studi Keandalan Struktur Gedung Tinggi Tidak Beraturan Menggunakan Push Over Analisis Pada Tanah Medium.*"

Disusun Oleh :

Nama : Ulfa Nurdianti

D111 08 304

Telah diperiksa dan disetujui
Oleh Dosen Pembimbing

Makassar, 13 September 2013

Pembimbing I

Prof. Dr. Ing. Herman Parung, M.Eng.
Nip. 19620729 1987031001

Pembimbing II

Dr. Eng. A. Arwin Amiruddin, ST. MT.
Nip. 19791226 200501 001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Sipil,



Prof. Dr. Ir. H. Lawalenna Samang, MS.M.Eng.
Nip. 19601231 198503 1 001

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT, karena atas segala berkah dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul **“STUDI KEANDALAN STRUKTUR GEDUNG TINGGI TIDAK BERATURAN MENGGUNAKAN *PUSHOVER ANALYSIS* PADA TANAH MEDIUM”**, sebagai salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Fakultas Teknik Jurusan Sipil Universitas Hasanuddin.

Kami menyadari sepenuhnya bahwa selesainya tugas akhir ini berkat bantuan dari berbagai pihak, utamanya dosen pembimbing kami :

Pembimbing I : Prof. Dr. Ing. Herman Parung, M.Eng

Pembimbing II : Dr. Eng. A. Arwin Amiruddin, ST.MT.

Dengan segala kerendahan hati, kami juga ingin menyampaikan terima kasih serta penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. Ayahanda Bardin dan ibunda Farida tercinta atas pengorbanan dan doa kepada kami.
2. Bapak DR. Ing Ir. Wahyu H. Piarah, MS, ME. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Lawalenna Samang, MS.M.Eng. selaku ketua Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Bapak Prof. Dr. Ing. Herman Parung, M.Eng. selaku dosen pembimbing I, yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.

5. Bapak Dr. Eng. A. Arwin Amiruddin, ST.MT. selaku dosen pembimbing II, yang telah banyak meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan kepada kami.
6. Seluruh dosen, staf dan karyawan Fakultas Teknik Jurusan Sipil Universitas Hasanuddin.
7. Saudara-saudara tercinta Husnaeni, Sahardin, Arnia, Hasmia, dan Nurcahyani yang senantiasa berdoa dan terus memberikan semangat .
8. Penulis juga menghaturkan terima kasih kepada senior dan teman-teman angkatan 2008 , khususnya Sita, Dian, Prima, Wana, Nata, Ningsi, Ellen, Ona dan seluruh teman-teman yang tidak bisa saya sebutkan namanya satu persatu.

Kami menyadari bahwa tulisan ini tidak luput dari kekurangan-kekurangan. Oleh karena itu penulis mengharapkan kepada para pembaca, kiranya dapat memberikan sumbangan pemikiran demi kesempurnaan dan pembaharuan tugas akhir ini.

Akhir kata, semoga ALLAH SWT melimpahkan Rahmat dan Taufiq-Nya kepada kita, dan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pihak-pihak yang berkepentingan.

Makassar, Juli 2013

Penulis

ABSTRAK

Analisis pushover atau analisis beban dorong statik merupakan prosedur analisis untuk mengetahui perilaku keruntuhan suatu bangunan terhadap gempa dengan memberikan pola beban statik tertentu dalam arah lateral yang besarnya ditingkatkan secara bertahap (incremental) sampai struktur tersebut mencapai target displacement tertentu atau mencapai pola keruntuhan tertentu. Hasil dari analisis ini berupa kurva kapasitas yang dapat menunjukkan titik kinerja gedung pada saat menerima beban gempa. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja bangunan tinggi tidak beraturan yaitu gedung Karebosi Condotel. Perilaku struktur dievaluasi secara tiga dimensi (3D) berdasarkan analisis beban dorong statik (Pushover Analysis) dengan menggunakan software SAP 2000 Versi 15. Hasil dari analisis pushover menunjukkan bahwa titik kinerja gedung Karebosi Condotel untuk pembebanan gempa arah-X (portal arah memanjang gedung) adalah 0,132 meter dengan gaya geser dasar yang terjadi 926,851 ton, sedangkan untuk pembebanan gempa arah-Y (portal arah pendek gedung) diperoleh titik kinerja gedung yaitu 0,133 meter dengan gaya geser yang terjadi adalah 673,099 ton. Dari titik kinerja diperoleh simpangan struktur (structural-drift ratio) yang terjadi akibat pembebanan gempa arah-X dan arah-Y adalah 0,198% dan 0,199% maka level kinerja struktur berdasarkan batas simpangan yang disyaratkan oleh FEMA 356 dan ATC-40 termasuk pada level Immediate Occupancy.

Kata kunci : Analisis pushover, Kurva Kapasitas, Titik Kinerja, Level Kinerja Struktur

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR NOTASI	ix
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.....	I-1
1.2. Rumusan Masalah.....	I-3
1.3. Tujuan Penelitian.....	I-3
1.4. Batasan Masalah.....	I-4
1.5. Sistematika Penulisan.....	I-5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Struktur Bangunan Gedung Beraturan dan Tidak Beraturan	II-1
2.2. Perencanaan Tahan Gempa Berbasis Kinerja.....	II-3
2.3. Evaluasi Kinerja Struktur dengan Analisa <i>Pushover</i>	II-7
2.3.1. Analisa <i>Pushover</i>	II-7

2.3.2. Target Perpindahan.....	II-12
2.3.3. Level Kinerja Struktur.....	II-18

BAB III TINJAUAN UMUM DAN METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Model Struktur Bangunan.....	III-1
3.2. Data.....	III-4
3.2.1 Data Bangunan.....	III-4
3.2.2 Data Material.....	III-4
3.2.3 Dimensi Elemen Struktur.....	III-5
3.3. Analisa Pembebanan Pada Struktur.....	III-6
3.3.1 Beban Gravitasi.....	III-6
3.3.2 Beban Gempa.....	III-7
3.4. Diagram Alir Penelitian.....	III-9

BAB IV PEMBAHASAN

4.1. Analisis Struktur.....	IV-1
4.2. Analisa <i>Pushover</i>	IV-10
4.3. Kurva kapasitas.....	IV-12
4.3.1. Menentukan Target Perpindahan dengan Metode Spektrum Kapasitas (ATC 40)	IV-17
4.3.2. Evaluasi Kinerja Struktur.....	IV-22
4.3.3. Sendi Plastis.....	IV-23

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan.....	V-1
5.2. Saran.....	V-2

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR NOTASI

- C_a = *Peak Ground Acceleration* atau percepatan batuan dasar gempa periode ulang tertentu
- C_v = koefisien percepatan gempa dari kurva Respons Spektrum pada saat periode bangunan sebesar 1 detik
- F_i = beban gempa nominal pada lantai ke- i
- g = percepatan gravitasi $9,81 \text{ m/det}^2$
- I = faktor keutamaan bangunan
- n = jumlah tingkat gedung
- R = faktor reduksi gempa
- T_1 = waktu getar alami fundamental stuktur (detik)
- V_1 = gaya geser dasar nominal sebagai respons ragam yang pertama
- W_t = total beban mati dan beban hidup yang dapat direduksi
- z_i = ketinggian lantai tingkat ke- i diukur dari taraf penjepitan lateral
- δ_T = target perpindahan
- ξ = koefisien pembatas yang ditetapkan berdasarkan Tabel 8 pada SNI 03-1726-2002

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Kriteria Kinerja.....	II-4
Tabel 2.2	Batasan Tipe Bangunan berdasarkan ATC-40.....	II-16
Tabel 2.3	Target level kinerja struktur gedung menurut FEMA 356 (2000).....	II-18
Tabel 2.4	Batasan simpangan untuk berbagai level kinerja struktur (FEMA 356, 2000)	II-19
Tabel 2.5	Batasan simpangan untuk berbagai level kinerja struktur (ATC-40,1996).....	II-19
Tabel 3.1	Dimensi Elemen Struktur.....	III-5
Tabel 4.1	Distribusi Gaya Geser Dasar Sepanjang Tinggi Gedung....	IV-3
Tabel 4.2	Perhitungan T – Rayleigh dalam Arah X (Tx).....	IV-5
Tabel 4.3	Perhitungan T – Rayleigh dalam Arah Y (Ty)).....	IV-6
Tabel 4.4	Gaya Reaksi Dasar (belum dikoreksi).....	IV-7
Tabel 4.5	Gaya Reaksi Dasar (setelah dikoreksi).....	IV-8
Tabel 4.6	Perpindahan titik kontrol dan gaya geser dasar step 0-32 arah-X.....	IV-14
Tabel 4.7	Perpindahan titik kontrol dan gaya geser dasar step 0-31 arah-Y	IV-16
Tabel 4.8	Target perpindahan dan gaya geser dasar pada titik kontrol	IV-20
Tabel 4.9	Perbandingan target perpindahan dengan batasan <i>displacement</i>	IV-22

Tabel 4.7	Perhitungan <i>drift ratio</i> berdasarkan titik kontrol perpindahan pada saat target perpindahan tercapai.....	IV-22
Tabel 4.8	Jumlah elemen dan tingkat kerusakan yang terjadi pada elemen struktur untuk arah pembebanan-X.....	IV-23
Tabel 4.9	Jumlah elemen dan tingkat kerusakan yang terjadi pada elemen struktur untuk arah pembebanan-Y.....	IV-26

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Tonjolan-tonjolan pada Gedung.....	II-1
Gambar 2.2	Sistem Tidak Paralel.....	II-2
Gambar 2.3	Loncatan Bidang Muka.....	II-2
Gambar 2.4	Bukaan pada Bangunan.....	II-3
Gambar 2.5	Ilustrasi Rekayasa Gempa Berbasis Kinerja.....	II-6
Gambar 2.6	Posisi Sumbu Lokal Balok.....	II-9
Gambar 2.7	Posisi Sumbu Lokal Kolom.....	II-10
Gambar 2.8	Kurva Beban – Perpindahan Umum.....	II-10
Gambar 2.9	Penentuan Titik Kinerja menurut Metode Spektrum	
	Kapasitas	II-15
Gambar 2.10	Parameter Data Respons Spektrum Rencana.....	II-16
Gambar 2.11	Prosedur Analisis Kinerja (ATC-40)	II-17
Gambar 3.1	Denah Gedung Karebosi Condotel.....	III-1
Gambar 3.2	Elevasi Antar Tingkat Gedung Karebosi Condotel	III-2
Gambar 3.3	Tampilan Tiga Dimensi Gedung Karebosi Condotel	III-3
Gambar 3.4	Respons Spektrum Wilayah 2.....	III-7
Gambar 3.5	Diagram Alir Penelitian.....	III-9
Gambar 4.1	Simpangan antar tingkat arah-X.....	IV-9
Gambar 4.2	Simpangan antar tingkat arah-Y.....	IV-10
Gambar 4.3	Input pembebanan gravitasi.....	IV-11
Gambar 4.4	Bentuk deformasi struktur akibat beban gravitasi.....	IV-11

Gambar 4.5	Input pembebanan arah-X dan arah-Y.....	IV-12
Gambar 4.6	Kurva Kapasitas Arah-X.....	IV-13
Gambar 4.7	Kurva Kapasitas Arah-Y.....	IV-15
Gambar 4.8	Perbandingan kurva kapasitas gedung arah-X dan arah-Y...	IV-17
Gambar 4.9	Input nilai C_a dan C_v dari kurva respon spektrum.....	IV-18
Gambar 4.10	Kurva kapasitas arah-X dalam format ADRS.....	IV-18
Gambar 4.11	Kurva kapasitas arah-Y dalam format ADRS.....	IV-19
Gambar 4.12	Perbandingan gaya geser dasar hasil analisis Respon Spektrum dengan gaya geser dasar hasil analisis Pushover.....	IV-21
Gambar 4.13	Distribusi sendi plasti pada step-6 untuk pembebanan arah-X.....	IV-25
Gambar 4.14	Jumlah elemen dan tingkat kerusakan yang terjadi pada portal D.....	IV-25
Gambar 4.15	Distribusi sendi plasti pada step-6 untuk pembebanan arah-Y.....	IV-28
Gambar 4.16	Jumlah elemen dan tingkat kerusakan yang terjadi pada portal 6.....	IV-29

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Gedung Karebosi Condotel
- Lampiran 2 Tutorial SAP2000 versi 15 *Pushover Analysis*
- Lampiran 3 Output *Pushover Analysis*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dalam Standar Nasional Indonesia (SNI 03-1726-2002) tentang Tata Cara Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung, struktur bangunan gedung dibedakan ke dalam dua kategori, yaitu struktur bangunan gedung beraturan, dan tidak beraturan. Menurut Paulay dan Priestley (1991), bangunan dengan bentuk beraturan, sederhana dan simetris lebih disukai dalam desain ketahanan gempa dibandingkan bangunan yang tidak beraturan. Struktur gedung yang ketinggiannya melebihi batas ketinggian struktur gedung beraturan harus memperhitungkan tambahan momen guling akibat efek P-Delta yang terjadi pada struktur gedung yang fleksibel. Bangunan tidak beraturan juga mudah mengalami puntir akibat pusat massa dan pusat kekakuan yang tidak berimpit. Selain itu, bangunan tidak beraturan juga dapat mengalami respon yang tak terduga akibat pengaruh ragam yang lebih tinggi (*higher mode effect*).

Perencanaan struktur bangunan gedung tidak beraturan umumnya didasarkan pada analisa dinamik elastis yang merupakan analisa yang paling sederhana, tetapi kegunaannya masih terbatas untuk mengetahui terbentuknya sendi plastis pertama. Kenyataannya bahwa perilaku keruntuhan bangunan pada saat gempa adalah inelastis. Analisa ini tidak mampu memperhitungkan cadangan kekuatan yang ada pada struktur mulai dari terbentuknya sendi plastis pertama hingga keruntuhan yang sebenarnya. Sehingga evaluasi yang dapat

memperkirakan kondisi inelastis bangunan pada saat gempa terjadi diperlukan untuk mendapatkan jaminan bahwa kinerja gedung memuaskan saat gempa.

Analisa *pushover* (ATC 40, 1996) merupakan salah satu komponen *performance based seismic design* yang memanfaatkan teknik analisa non-linier berbasis komputer untuk menganalisa perilaku inelastis struktur dari berbagai macam intensitas gerakan tanah (gempa), sehingga dapat diketahui kinerjanya pada kondisi kritis yang menjadi sarana untuk mengetahui kinerja struktur bangunan terhadap gempa. Analisa *pushover* atau analisa beban dorong statik merupakan prosedur analisa untuk mengetahui perilaku keruntuhan suatu bangunan terhadap gempa dengan memberikan pola beban statik tertentu dalam arah lateral yang besarnya ditingkatkan secara bertahap (*incremental*) sampai struktur tersebut mencapai target *displacement* tertentu atau mencapai pola keruntuhan tertentu.

Hasil akhir dari analisis ini berupa kurva kapasitas struktur (*capacity curve*) yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dan perpindahan atap (*roof displacement*). Melalui kurva kapasitas tersebut dapat diketahui kinerja dari struktur gedung yang dianalisis. Selain itu, analisa *pushover* juga dapat memperlihatkan secara visual perilaku struktur pada saat kondisi elastis, plastis dan sampai terjadinya keruntuhan pada elemen-elemen strukturnya. Metode analisa *pushover* dapat menghasilkan informasi yang sangat berguna karena mampu menggambarkan respons in-elastis bangunan ketika mengalami gempa.

Berkaitan dengan latar belakang di atas maka penulis tertarik untuk menyusun Tugas Akhir dengan judul :

**“STUDI KEANDALAN STRUKTUR GEDUNG TINGGI TIDAK
BERATURAN MENGGUNAKAN *PUSHOVER ANALYSIS* PADA TANAH
MEDIUM”**

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang masalah, maka dalam penelitian ini pokok permasalahan yang ada dirumuskan sebagai berikut :

1. Bagaimana perilaku/kinerja struktur gedung tinggi tidak beraturan berdasarkan titik evaluasi kinerjanya pada kondisi inelastis dengan melakukan analisis statik beban dorong (*Pushover Analysis*).
2. Bagaimana mengestimasi model kerusakan struktur dengan cara menentukan posisi-posisi sendi plastis pada struktur gedung setelah melakukan analisis statik beban dorong (*Pushover Analysis*).

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penyusunan tugas akhir ini adalah :

1. Menghasilkan kurva kapasitas (*capacity curve*) struktur gedung.
2. Menentukan titik kinerja (*performance point*) struktur gedung pada kondisi inelastis.
3. Menentukan level kinerja (*performance level*) struktur gedung pada saat titik kinerja tercapai.

4. Menganalisa skema kelelahan (distribusi sendi plastis) yang terjadi akibat pengaruh beban gempa.

1.4. Batasan Masalah

Ruang lingkup pembahasan dibatasi pada :

1. Gedung yang dianalisis adalah gedung Karebosi Condotel, Makassar dengan ketinggian 18 lantai atau 66,65 meter.
2. Data struktur gedung Karebosi Condotel berupa dimensi struktur dan mutu bahan berdasarkan data dari proyek Karebosi Condotel yang diperoleh dari PT. Pembangunan Perumahan Persero Tbk. selaku kontraktor dari proyek tersebut.
3. Jenis beban yang digunakan dalam meninjau perilaku struktur adalah beban gravitasi dan beban lateral. Beban gravitasi yang dimaksud mencakup beban mati dan beban hidup tereduksi yang mengacu pada Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung 1983, sedangkan beban lateral yang ditinjau adalah beban gempa. Pembebanan lateral yang digunakan melalui analisis ragam respons spektrum gempa wilayah 2 pada kondisi tanah medium yang mengacu pada SNI 03-1726-2002.
4. Perilaku struktur dievaluasi secara tiga dimensi (3D) berdasarkan analisis statik beban dorong (*Pushover Analysis*) dengan menggunakan software aplikasi sipil SAP 2000 Versi 15.
5. Penentuan target perpindahan struktur gedung berdasarkan metode spektrum kapasitas (ATC-40).

6. Pedoman-pedoman yang digunakan sebagai acuan adalah :
- Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Bertulang untuk Bangunan Gedung (SK SNI 03-2847-2002)
 - Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung (PPIUG) 1983
 - Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Bangunan Gedung (SK SNI 03-1726-2002)
 - *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings* (FEMA 356)
 - *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Volume 1* (ATC 40)

1.5. Sistematika Penulisan

Untuk memberikan gambaran umum mengenai keseluruhan penyusunan Tugas Akhir ini, maka berikut ini penulis uraikan secara singkat sistematika penulisan yang dibagi dalam 5 (lima) bab, yaitu :

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini merupakan garis besar sekaligus pengantar dalam penyusunan yang menguraikan secara umum tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menguraikan dasar-dasar teori mengenai struktur bangunan beraturan dan tidak beraturan, perencanaan tahan gempa berbasis kinerja, dan analisa *pushover*.

BAB III : GAMBARAN UMUM DAN METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menguraikan tinjauan umum penelitian mengenai gambaran umum Gedung Karebosi Condotel serta bagan alir dan prosedur analisis.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil analisis perhitungan data-data yang diperoleh serta pembahasan dari hasil analisis.

BAB V : PENUTUP

Bab ini merupakan bab yang berisikan kesimpulan dan saran yang penulis kemukakan sesuai dengan pembahasan dalam tulisan ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

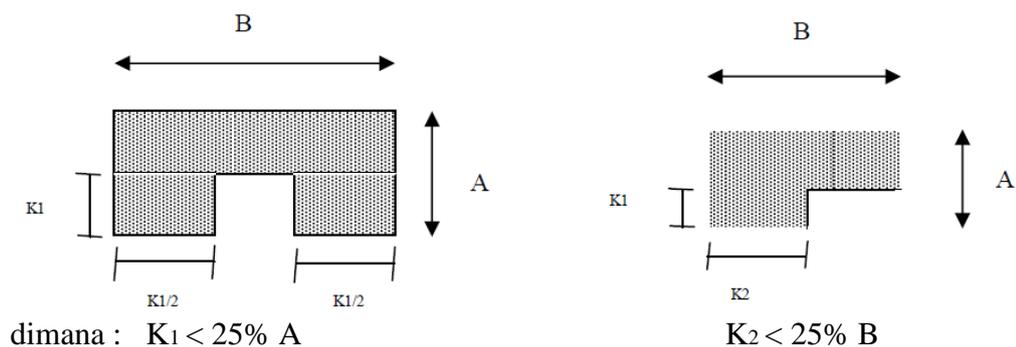
2.1. Struktur Bangunan Gedung Beraturan dan Tidak Beraturan

Menurut Standar Nasional Indonesia (SNI 03-1726-2002) tentang Tata Cara Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung, struktur bangunan gedung dibedakan ke dalam 2 (dua) kategori, yaitu :

1. Struktur Bangunan Gedung Beraturan, dan
2. Struktur Bangunan Gedung tidak Beraturan

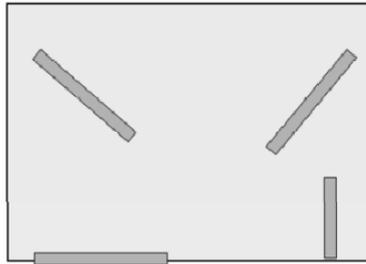
Adapun yang dimaksud dengan struktur bangunan gedung beraturan adalah struktur bangunan gedung yang memenuhi kriteria antara lain :

- Tinggi struktur bangunan gedung diukur dari taraf penjepitan lateral tidak lebih dari sepuluh tingkat atau 40 m.
- Denah struktur bangunan gedung adalah persegi panjang atau dengan tonjolan $\leq 25\%$ ukuran terbesar denah bangunan.



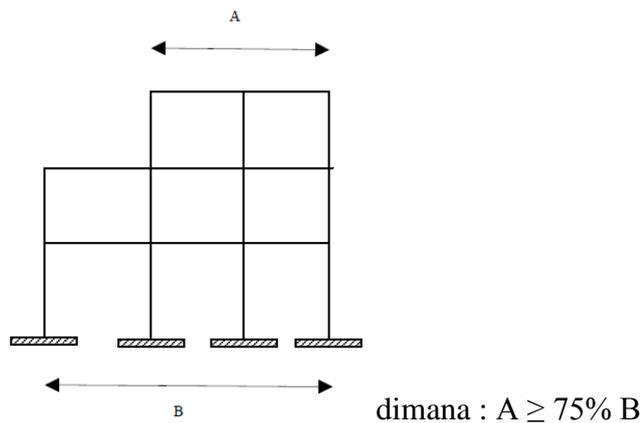
Gambar 2.1. Tonjolan-tonjolan pada Gedung

- Sistem struktur bangunan gedung terbentuk oleh subsistem-subsistem pemikul beban lateral yang arahnya saling tegak lurus dan sejajar.



Gambar 2.2. Sistem Tidak Paralel

- Sistem struktur bangunan gedung tidak menunjukkan loncatan bidang muka dan walaupun mempunyai loncatan bidang muka, ukuran dari denah struktur bagian gedung yang menjulang dalam masing-masing arah $\geq 75\%$ dari ukuran terbesar denah struktur bagian gedung yang ada di bawahnya.



Gambar 2.3. Loncatan Bidang Muka

- Sistem struktur bangunan gedung memiliki kekakuan lateral yang beraturan, tanpa adanya tingkat lunak.
- Sistem struktur bangunan gedung memiliki berat lantai tingkat yang beraturan.
- Sistem struktur bangunan gedung memiliki unsur-unsur vertikal dari sistem pemikul beban lateral yang menerus, tanpa perpindahan titik beratnya, kecuali bila perpindahan tersebut tidak lebih dari setengah ukuran unsur dalam arah perpindahan tersebut.

- Sistem struktur bangunan gedung memiliki lantai tingkat yang menerus, tanpa lubang atau bukaan yang luasnya lebih dari 50% luas seluruh tingkat.



Gambar 2.4. Bukaan pada Bangunan

Sedangkan struktur bangunan gedung yang tidak memenuhi kriteria-kriteria seperti diatas, dikategorikan sebagai struktur bangunan gedung tidak beraturan. Untuk struktur gedung tidak beraturan, pengaruh Gempa Rencana harus ditinjau sebagai pengaruh pembebanan gempa yang berperilaku dinamik, dan analisisnya dilakukan berdasarkan analisis respons dinamik, yaitu suatu analisis dinamik yang memperhatikan semua ragam getar yang mungkin terjadi pada struktur bangunan. Analisis respons dinamik dapat dilakukan dengan analisis ragam spektrum respons dan analisis respons dinamik riwayat waktu.

2.2. Perencanaan Tahan Gempa Berbasis Kinerja

Konsep perencanaan tahan gempa berbasis kinerja yang dikenal dengan *Performanced Based Earthquake Engineering* (PBEE) merupakan kombinasi dari aspek tahanan dan aspek layan. Konsep PBEE dapat digunakan untuk mendesain bangunan baru (*Performanced Based Seismic Design*) maupun evaluasi bangunan yang sudah ada (*Performanced Based Seismic Evaluation*).

Metode tersebut mulai populer sejak diterbitkannya dokumen Vision 2000 (SEAOC, 1995) dan NEHRP (BSSC, 1995), yang didefinisikan sebagai strategi

dalam perencanaan, pelaksanaan dan perawatan / perkuatan sedemikian agar suatu bangunan mampu berkinerja pada suatu kondisi gempa yang ditetapkan, yang diukur dari besarnya kerusakan dan dampak perbaikan yang diperlukan. Kriteria kinerja yang ditetapkan Vision 2000 dan NEHRP adalah sebagai berikut :

Tabel 2.1. Kriteria Kinerja

Level Kinerja		Penjelasan
NEHRP	Vision 2000	
<i>Operational</i>	<i>Fully Functional</i>	Tak ada kerusakan berarti pada struktur dan non-struktur, bangunan tetap berfungsi.
<i>Immediate Occupancy</i>	<i>Operational</i>	Tidak ada kerusakan yang berarti pada struktur, dimana kekuatan dan kekakuannya kira-kira hampir sama dengan kondisi sebelum gempa. Komponen non-struktur masih berada ditempatnya dan sebagian besar masih berfungsi jika utilitasnya tersedia. Bangunan dapat tetap berfungsi dan tidak terganggu dengan masalah perbaikan.
<i>Life Safety</i>	<i>Life Safe</i>	Terjadi kerusakan komponen struktur, kekakuan berkurang, tetapi masih mempunyai ambang yang cukup terhadap keruntuhan. Komponen non-struktur masih ada tetapi tidak berfungsi. Dapat dipakai lagi jika sudah dilakukan perbaikan.
<i>Collapse Prevention</i>	<i>Near Collapse</i>	Kerusakan yang berarti pada komponen struktur dan non-struktur. Kekuatan struktur dan kekakuannya berkurang banyak, hampir runtuh. Kecelakaan akibat kejatuhan material bangunan yang rusak sangat mungkin terjadi.

Metodologi yang didasarkan pada *performance based seismic design* ini merupakan kriteria desain dan evaluasi yang diekspresikan sebagai obyektivitas dari daya guna struktur. Hal tersebut dapat menetapkan berbagai tingkatan kinerja struktur (*multiple performance objective level*), dimana tingkatan kinerja (*performance*) dari struktur bangunan merupakan pilihan yang dapat direncanakan pada tahap awal dengan berbagai kondisi batas. Kondisi batas ini bersifat fleksibel, karena merupakan kesepakatan dari pihak pemilik bangunan (*owner*) dan perencana. Tujuan utama dari *performance based seismic design* ialah menciptakan bangunan tahan gempa yang daya gunanya dapat diperkirakan.

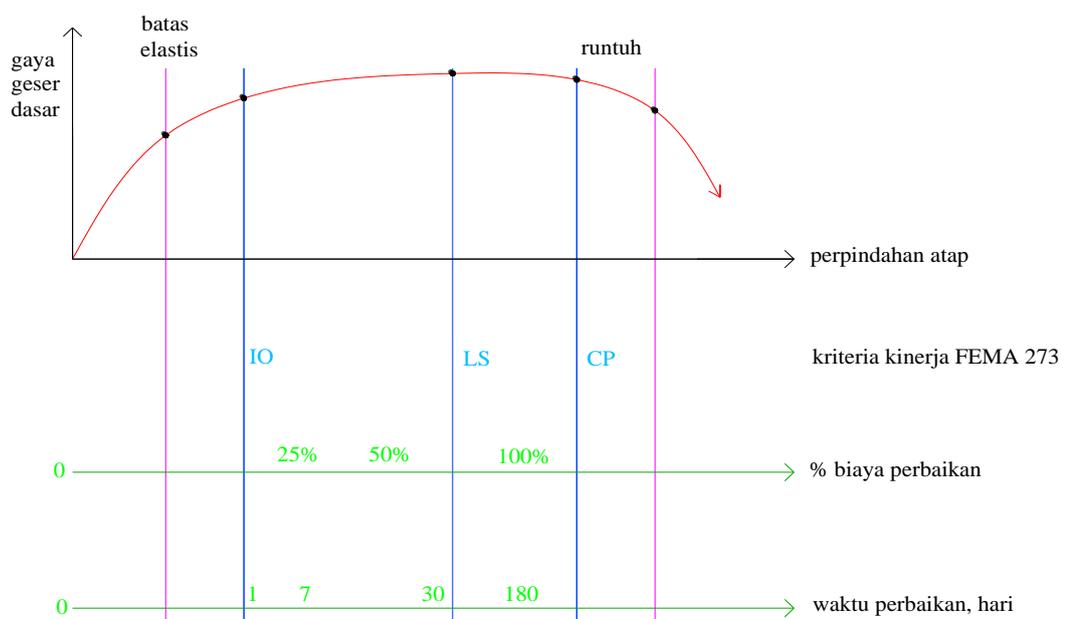
Performance based seismic design mempunyai dua elemen utama dalam perencanaannya yaitu kapasitas struktur (*capacity*) dan beban (*demand*). Beban (*demand*) merupakan representasi dari gerakan tanah akibat gempa bumi, dimana yang akan digambarkan sebagai kurva respon spektrum. Kapasitas struktur adalah kemampuan dari struktur untuk menanggulangi gaya gempa tanpa mengalami kerusakan.

Proses perencanaan tahan gempa berbasis kinerja dimulai dengan membuat model rencana bangunan kemudian melakukan simulasi kinerjanya terhadap berbagai kejadian gempa. Setiap simulasi memberikan informasi tingkat kerusakan (*level of damage*), ketahanan struktur, sehingga dapat memperkirakan berapa besar keselamatan (*life*), kesiapan pakai (*occupancy*) dan kerugian harta benda (*economic loss*) yang akan terjadi. Perencana selanjutnya dapat mengatur ulang resiko kerusakan yang dapat diterima sesuai dengan resiko biaya yang dikeluarkan.

Hal penting dari perencanaan berbasis kinerja adalah sasaran kinerja bangunan terhadap gempa dinyatakan secara jelas, sehingga pemilik, penyewa, asuransi, pemerintahan atau penyandang dana mempunyai kesempatan untuk menetapkan kondisi apa yang dipilih, selanjutnya ketentuan tersebut digunakan insinyur perencana sebagai pedomannya. Sasaran kinerja terdiri dari kejadian gempa rencana yang ditentukan (*earthquake hazard*), dan taraf kerusakan yang diijinkan atau level kinerja (*performance level*) dari bangunan terhadap kejadian gempa tersebut.

Mengacu pada FEMA-273 (1997) yang menjadi acuan klasik bagi perencanaan berbasis kinerja maka kategori level kinerja struktur, adalah :

- Segera dapat dipakai (IO = *Immediate Occupancy*),
- Keselamatan penghuni terjamin (LS = *Life-Safety*),
- Terhindar dari keruntuhan total (CP = *Collapse Prevention*).



Gambar 2.5. Ilustrasi Rekayasa Gempa Berbasis Kinerja

Gambar 2.5 menjelaskan secara kualitatif level kinerja (*performance levels*) FEMA 273 yang digambarkan bersama dengan suatu kurva hubungan gaya-perpindahan yang menunjukkan perilaku struktur secara menyeluruh (global) terhadap pembebanan lateral. *Performance point* merupakan estimasi dimana kapasitas struktur mampu menahan beban (*demand*) yang diberikan. Dari titik kinerja (*performance point*) ini dapat diketahui tingkat kerusakan struktur berdasarkan perpindahan lateralnya (*drift*). Selain itu dapat juga dikorelasikan dibawahnya berapa prosentase biaya dan waktu yang diperlukan untuk perbaikan. Informasi itu tentunya sekedar gambaran perkiraan, meskipun demikian sudah mencukupi untuk mengambil keputusan apa yang sebaiknya harus dilakukan terhadap hasil analisis bangunan tersebut.

2.3. Evaluasi Kinerja Struktur dengan Analisa *Pushover*

2.3.1. Analisa *Pushover*

Analisis *pushover* (ATC 40, 1996) merupakan salah satu komponen *Performance Based Seismic Design* yang menjadi sarana dalam mencari kapasitas dari suatu struktur. Menurut SNI 03-1726-2002, analisa *pushover* atau analisa beban dorong statik adalah suatu cara analisa statik dua dimensi atau tiga dimensi linier dan non-linier, dimana pengaruh gempa rencana terhadap struktur gedung dianggap sebagai beban-beban statik yang menangkap pada pusat massa masing-masing lantai, yang nilainya ditingkatkan secara berangsur-angsur sampai melampaui pembebanan yang menyebabkan terjadinya pelelehan (sendi plastis) pertama di dalam struktur gedung, kemudian dengan peningkatan beban lebih

lanjut mengalami perubahan bentuk elastoplastis yang besar sampai mencapai kondisi di ambang keruntuhan.

Prosedur analisisnya akan menjelaskan bagaimana mengidentifikasi bagian-bagian dari bangunan yang akan mengalami kegagalan terlebih dahulu. Seiring dengan penambahan beban akan ada elemen-elemen yang lain mengalami leleh dan mengalami deformasi *inelastic*. Hasil akhir dari analisis ini berupa nilai-nilai gaya-gaya geser dasar (*base shear*) untuk menghasilkan perpindahan dari struktur tersebut. Nilai-nilai tersebut akan digambarkan dalam bentuk kurva kapasitas yang merupakan gambaran perilaku struktur dalam bentuk perpindahan lateral terhadap beban (*demand*) yang diberikan. Selain itu, analisis *pushover* dapat menampilkan secara visual elemen-elemen struktur yang mengalami kegagalan, sehingga dapat dilakukan pencegahan dengan melakukan pendetailan khusus pada elemen struktur tersebut.

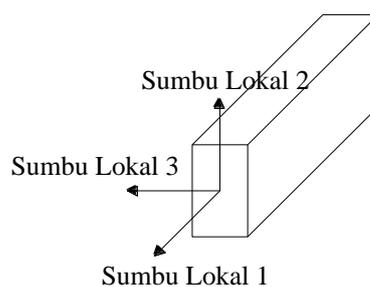
Analisa *pushover* dapat digunakan sebagai alat bantu untuk perencanaan tahan gempa, asalkan menyesuaikan dengan keterbatasan yang ada, yaitu :

- Hasil analisa *pushover* masih berupa suatu pendekatan, karena bagaimanapun perilaku gempa yang sebenarnya adalah bersifat bolak-balik melalui suatu siklus tertentu, sedangkan sifat pembebanan pada analisa *pushover* adalah statik monotonik.
- Pemilihan pola beban lateral yang digunakan dalam analisa adalah sangat penting.
- Keandalan analisa *pushover* menurun sejalan dengan bertambahnya pengaruh ragam yang lebih tinggi.

- Untuk membuat model analisa nonlinier akan lebih rumit dibanding model analisa linier. Model tersebut harus memperhitungkan karakteristik inelastik beban-deformasi dari elemen-elemen yang penting dan efek P- Δ .

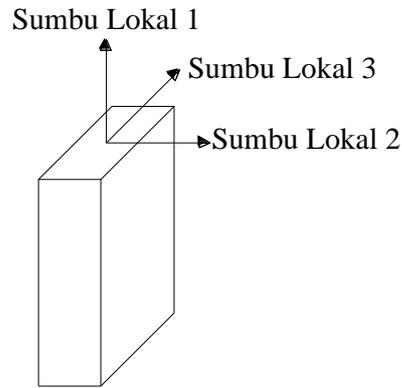
Karena yang dievaluasi adalah komponen maka jumlahnya relatif sangat banyak, oleh karena itu analisa *pushover* sepenuhnya harus dikerjakan oleh komputer (fasilitas *pushover* dan evaluasi kinerja yang terdapat secara *built-in* pada program SAP2000, mengacu pada FEMA - 356). Tahapan utama dalam analisa *pushover* adalah :

1. Perilaku leleh dan pasca leleh pada elemen struktur dimodelkan dalam *hinges properties* yang merupakan kondisi dimana struktur mengalami leleh pertama, sehingga dimensi dan mutu beton serta tulangan mempengaruhi. *Hinges properties* untuk elemen balok adalah momen M_3 , yang berarti sendi plastis terjadi hanya karena momen searah sumbu lokal 3. Posisi sumbu lokal 3 pada elemen balok dapat dilihat pada gambar 2.6 berikut ini.



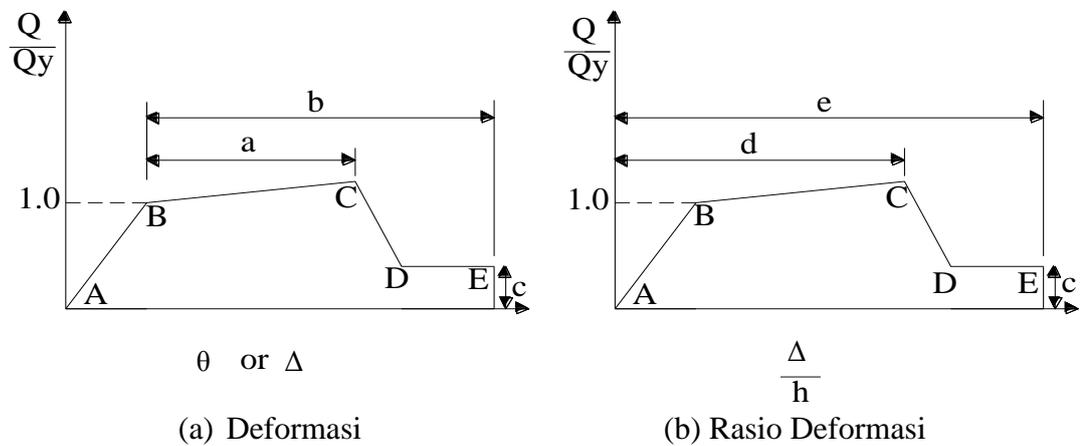
Gambar 2.6. Posisi Sumbu Lokal Balok

Hinge properties untuk elemen kolom adalah P- M_2 - M_3 yang artinya sendi plastis terjadi karena interaksi gaya aksial (P) dan momen (M) sumbu lokal 2 dan sumbu lokal 3. Posisi sumbu lokal 2 dan sumbu lokal 3 pada kolom dapat dilihat pada gambar 2.7 berikut.



Gambar 2.7. Posisi Sumbu Lokal Kolom

Jika tidak ada data eksperimental atau analisis dari perilaku plastifikasi sendi plastis elemen balok dan kolom maka kurva Beban-Lendutan Umum berikut, dengan parameter a, b, c, seperti yang didefinisikan dalam Tabel 6-7 and 6-8 FEMA 356, dapat digunakan untuk mengevaluasi komponen portal beton yang dikerjakan secara otomatis oleh program komputer SAP2000.



Gambar 2.8. Kurva Beban – Perpindahan Umum

- Letak sendi plastis pada analisa Pushover dengan SAP2000 hanya dapat dinyatakan sebagai panjang relatif 0 dan 1, yang berarti sendi plastis terletak pada joint-joint pertemuan balok dan kolom. Dengan kata lain, sendi plastis

hanya bisa diletakkan pada *start joint*, *end joint*, ataupun pada kedua joint tersebut dari elemen balok atau kolom.

3. Menentukan titik kontrol untuk memonitor besarnya perpindahan struktur. Rekaman besarnya perpindahan titik kontrol dan gaya geser dasar digunakan untuk menyusun kurva *pushover*.
4. Analisis *Pushover* dilakukan setelah struktur dibebani oleh beban gravitasi yang direncanakan. Jadi setelah struktur dibebani oleh beban gravitasi, beban statik lateral diberikan secara berangsur-angsur untuk mencapai *target displacement* tertentu.

Ada 2 macam bentuk *load application control* untuk analisa statis nonlinear yaitu *a load-controlled* dan *displacement-controlled*.

- *A load-controlled* dipakai apabila kita tahu pembesaran beban yang akan diberikan kepada struktur yang diperkirakan dapat menahan beban tersebut, contohnya adalah beban gravitasi. Pada *load-controlled* semua beban akan ditambahkan dari nol hingga pembesaran yang diinginkan.
 - *Displacement-controlled* dipakai apabila kita mengetahui sejauh mana struktur kita bergerak tetapi kita tidak tahu beban yang harus dimasukkan. Ini sangat berguna untuk mengetahui perilaku struktur tidak stabil dan mungkin kehilangan kapasitas pembawa beban selama analisa dilakukan.
5. Membuat kurva *pushover* yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dan perpindahan (*displacement*).
 6. Estimasi besarnya perpindahan lateral saat gempa rencana (*target perpindahan*). Titik kontrol didorong sampai taraf perpindahan tersebut, yang

mencerminkan perpindahan maksimum yang diakibatkan oleh intensitas gempa rencana yang ditentukan.

7. Mengevaluasi level kinerja struktur ketika titik kontrol tepat berada pada target perpindahan merupakan hal utama dari perencanaan berbasis kinerja. Komponen struktur dan aksi perilakunya dapat dianggap memuaskan jika memenuhi kriteria yang dari awal sudah ditetapkan, baik terhadap persyaratan deformasi maupun kekuatan. Karena yang dievaluasi adalah komponen maka jumlahnya relatif sangat banyak, oleh karena itu proses ini sepenuhnya harus dikerjakan oleh komputer (fasilitas *pushover* dan evaluasi kinerja yang terdapat secara *built-in* pada program *SAP2000*, mengacu pada *FEMA - 356*). Oleh karena itulah mengapa pembahasan perencanaan berbasis kinerja banyak mengacu pada dokumen *FEMA*.

2.3.2. Target Perpindahan

Gaya dan deformasi setiap komponen / elemen dihitung terhadap “perpindahan tertentu” di titik kontrol yang disebut sebagai “target perpindahan” dengan notasi δ_t dan dianggap sebagai perpindahan maksimum yang terjadi saat bangunan mengalami gempa rencana. Menurut Wiryanto Dewobroto (2005) untuk mendapatkan perilaku struktur pasca keruntuhan maka perlu dibuat analisa *pushover* untuk membuat kurva hubungan gaya geser dasar dan perpindahan lateral titik kontrol sampai minimal 150% dari target perpindahan, δ_t .

Permintaan membuat kurva *pushover* sampai minimal 150% target perpindahan adalah agar dapat dilihat perilaku bangunan yang melebihi kondisi

rencananya. Perencana harus memahami bahwa target perpindahan hanya merupakan rata-rata nilai dari beban gempa rencana. Perkiraan target perpindahan menjadi kurang benar untuk bangunan yang mempunyai kekuatan lebih rendah dari spektrum elastis rencana. Meskipun tidak didukung oleh data pada saat dokumen FEMA 356 ditulis tetapi diharapkan bahwa 150% target perpindahan adalah perkiraan nilai rata-rata ditambah satu standar deviasi perpindahan dari bangunan dengan kekuatan lateral melebihi 25% dari kekuatan spektrum elastis.

Analisa *pushover* dilakukan dengan memberikan beban lateral pada pola tertentu sebagai simulasi beban gempa, dan harus diberikan bersama-sama dengan pengaruh kombinasi beban mati dan tidak kurang dari 25% dari beban hidup yang disyaratkan. Kriteria evaluasi level kinerja kondisi bangunan didasarkan pada gaya dan deformasi yang terjadi ketika perpindahan titik kontrol sama dengan target perpindahan δ_t . Jadi parameter target perpindahan sangat penting peranannya bagi perencanaan berbasis kinerja.

Ada beberapa cara menentukan target perpindahan, salah satunya adalah *Capacity Spectrum Method* atau Metode Spektrum Kapasitas (FEMA 274 / 440, ATC 40).

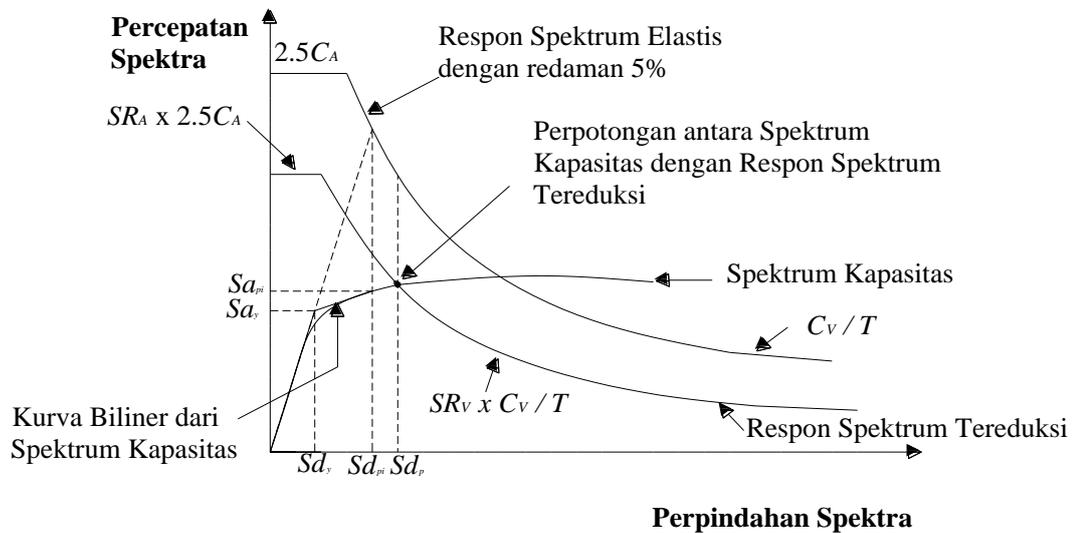
- **Metode Spektrum Kapasitas (ATC 40)**

Dalam Metode Spektrum Kapasitas, proses dimulai dengan menghasilkan kurva hubungan gaya perpindahan yang memperhitungkan kondisi inelastis struktur yang hasilnya diplot-kan dalam format ADRS (*acceleration displacement response spectrum*).

Kurva kapasitas dengan modifikasi tertentu diubah menjadi spektrum kapasitas (*capacity spectrum*), sedangkan respons spektrum diubah dalam format *acceleration displacement response spectrum*, ADRS. Format ADRS adalah gabungan antara *acceleration* dan *displacement* respons spektra dimana absis merupakan *acceleration* (S_a) dan ordinat merupakan *displacement* (S_d) sedangkan periode, T , adalah garis miring dari pusat sumbu.

Format tersebut adalah konversi sederhana dari kurva hubungan gaya geser dasar dengan perpindahan lateral titik kontrol dengan menggunakan properti dinamis sistem dan hasilnya disebut sebagai kurva kapasitas struktur. Gerakan tanah gempa juga dikonversi ke format ADRS. Hal itu menyebabkan kurva kapasitas dapat di-plot-kan pada sumbu yang sama sebagai gaya gempa perlu. Pada format tersebut waktu getar ditunjukkan sebagai garis radial dari titik pusat sumbu.

Waktu getar ekuivalen, T_e , dianggap sebagai secant waktu getar tepat dimana gerakan tanah gempa perlu yang direduksi karena adanya efek redaman ekuivalen bertemu pada kurva kapasitas. Karena waktu getar ekuivalen dan redaman merupakan fungsi dari perpindahan maka penyelesaian untuk mendapatkan perpindahan inelastik maksimum (titik kinerja) adalah bersifat iteratif. ATC-40 menetapkan batas redaman ekuivalen untuk mengantisipasi adanya penurunan kekuatan dan kekakuan yang bersifat gradual. Respons spektrum dalam bentuk ADRS ini kemudian dimodifikasi dengan memasukkan pengaruh *effective damping* yang terjadi akibat terbentuknya sendi plastis. Spektrum ini dinamakan *demand spectrum*.

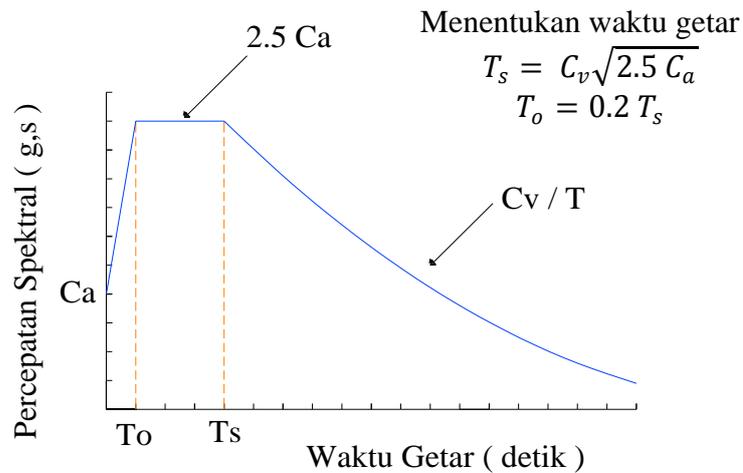


Gambar 2.9. Penentuan Titik Kinerja menurut Metode Spektrum Kapasitas

Gambar 2.9 menunjukkan metode spektrum kapasitas menyajikan secara grafis tiga buah grafik yaitu spektrum kapasitas (*capacity spectrum*), respons spektrum dan spektrum *demand* dalam format ADRS. Untuk mengetahui perilaku dari struktur yang ditinjau terhadap intensitas gempa yang diberikan, kurva kapasitas kemudian dibandingkan dengan tuntutan (*demand*) kinerja yang berupa respons spektrum berbagai intensitas (periode ulang) gempa. Target perpindahan diperoleh melalui titik perpotongan antara spektrum kapasitas dan dan spektrum *demand*.

Metode ini secara khusus telah *built-in* dalam program SAP2000, proses konversi kurva *pushover* dan kurva respon spektrum yang direduksi dikerjakan otomatis dalam program.

Data yang perlu dimasukkan cukup memberikan kurva Respons Spektrum Rencana dengan parameter seperti pada gambar berikut :



Gambar 2.10. Parameter Data Respons Spektrum Rencana

Gambar 2.10. merupakan kurva respons spektrum yang diambil dari SNI 03-1726-2002 yang penggunaannya disesuaikan dengan wilayah pembangunan berdasarkan Peta Gempa Indonesia dan kondisi tanah pada lokasi struktur gedung. Untuk mengetahui titik performa dari struktur, maka data yang perlu diinputkan adalah nilai C_a dan C_v , yaitu :

C_a = *Peak Ground Acceleration* atau percepatan batuan dasar gempa periode ulang tertentu

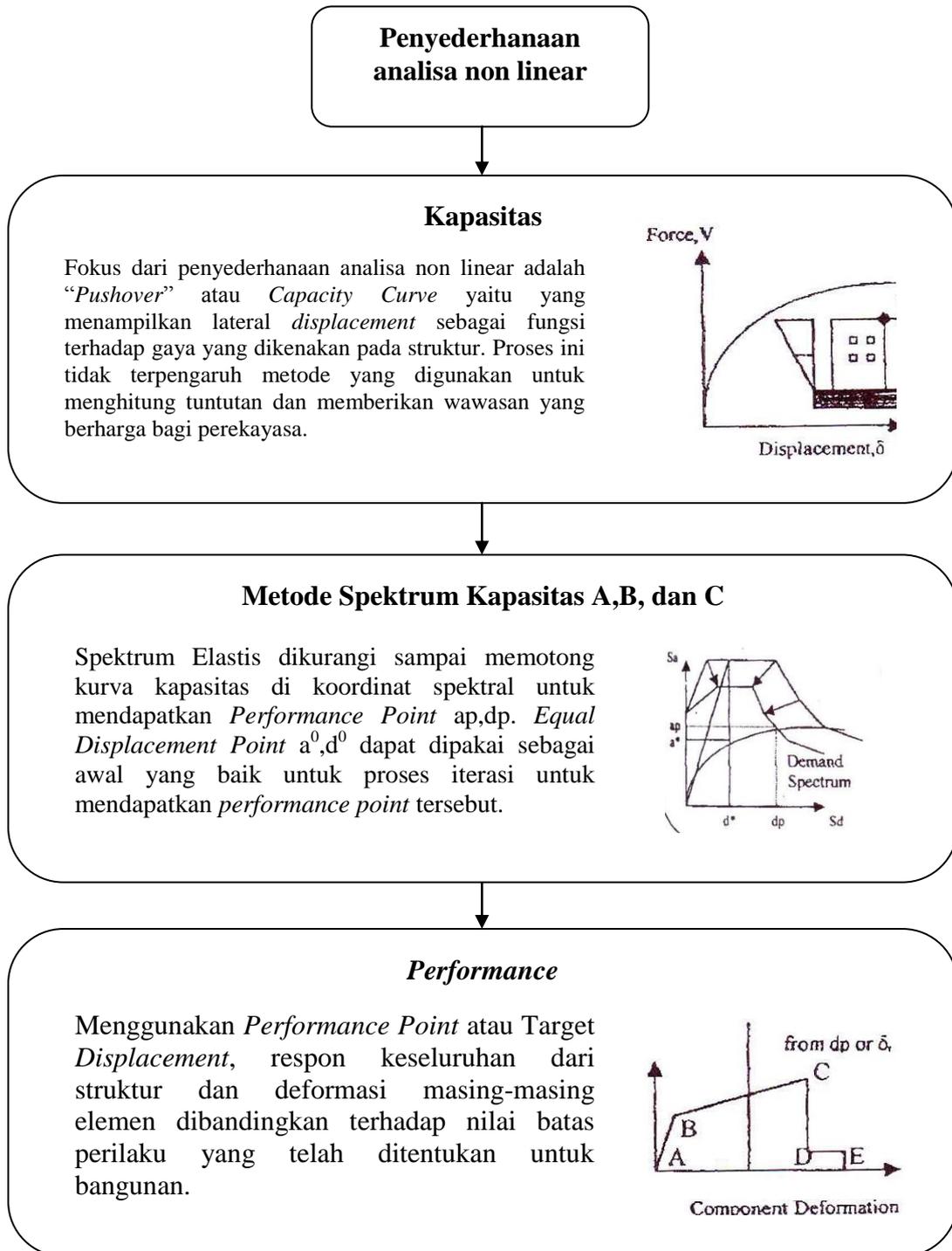
C_v = koefisien percepatan gempa dari kurva Respons Spektrum pada saat periode bangunan sebesar 1 detik.

Pada Metode Spektrum Kapasitas terdapat tiga keadaan bangunan, yakni tipe A,B, dan C, dengan batasan-batasan dari ketiga tipe bangunan tersebut adalah sebagai berikut :

Tabel 2.2. Batasan Tipe Bangunan berdasarkan ATC-40

<i>Shaking Duration</i>	<i>Essentially New Building</i>	<i>Average Existing Building</i>	<i>Poor Existing Building</i>
<i>Short</i>	<i>Type A</i>	<i>Type B</i>	<i>Type C</i>
<i>Long</i>	<i>Type B</i>	<i>Type C</i>	<i>Type C</i>

Prosedur analisa kinerja menggunakan bangunan dengan menggunakan metode analisa statik non linear ditampilkan pada gambar 2.11 berikut :



Gambar 2.11. Prosedur Analisis Kinerja (ATC-40)

2.3.3. Level Kinerja Struktur

Target level kinerja struktur gedung menurut FEMA 356 (2000)

ditampilkan dalam tabel 2.3. berikut :

Tabel 2.3. Target level kinerja struktur gedung menurut FEMA 356 (2000)

	<i>Collapse Prevention Level</i>	<i>Live Safety Level</i>	<i>Immediate Occupancy Level</i>	<i>Operational Level</i>
Kerusakan menyeluruh	Berat	Sedang	Ringan	Sangat ringan
Umum	Kekakuan dan kekuatan yang tersisa tinggal sedikit, tetapi kolom dan dinding tetap berfungsi dalam memikul beban. Simpangan permanen besar. Kerusakan pada dinding pengisi dan parapet. Bangunan di ambang runtuh.	Kekakuan dan kekuatan masih banyak tersisa pada setiap tingkat. Kemampuan memikul beban gravitasi elemen tetap berfungsi. Tidak terdapat kegagalan <i>out-of-plane</i> pada dinding atau parapet. Terdapat simpangan permanen. Kerusakan pada partisi. Bangunan membutuhkan perbaikan.	Tidak ada simpangan permanen. Struktur tetap memiliki kekuatan dan kekakuan rencana. Retak ringan pada partisi, langit-langit dan elemen struktur. Elevator dapat difungsikan kembali. Proteksi terhadap api dapat beroperasi.	Tidak ada simpangan permanen. Struktur tetap memiliki kekuatan dan kekakuan rencana. Retak ringan pada partisi, langit-langit dan elemen struktur. Semua sistem yang penting untuk beroperasi tetap berfungsi.
Komponen nonstruktur	Kerusakan besar	Resiko kejatuhan dapat dicegah, tetapi banyak komponen arsitektural, sistem mesin dan listrik yang rusak.	Peralatan dan muatan umumnya aman, tetapi mungkin tidak beroperasi akibat adanya kerusakan mesin.	Terdapat kerusakan yang tidak berarti. Daya dan utilitas tetap tersedia, yang dimungkinkan dari sumber cadangan.

Tabel 2.4. Batasan simpangan untuk berbagai level kinerja struktur
(FEMA 356, 2000)

Level Kinerja Struktur	<i>Drift (%)</i>	Keterangan
<i>Immediate Occupancy</i>	1,0	<i>Transient</i>
<i>Live Safety</i>	2,0	<i>Transient</i>
	1,0	<i>Permanent</i>
<i>Collapse Prevention</i>	4,0	<i>Transient atau permanent</i>

Tabel 2.5. Batasan simpangan untuk berbagai level kinerja struktur
(ATC-40,1996)

Batasan simpangan antar tingkat	Level kinerja struktur			
	<i>Immediate Occupancy</i>	<i>Damage Control</i>	<i>Live Safety</i>	<i>Structural Stability</i>
Simpangan total maksimum	0,01	0,01-0,02	0,02	$0,33 \frac{V_i}{P_i}$
Simpangan inelastis maksimum	0,005	0,005-0,015	Tidak dibatasi	Tidak dibatasi