

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Secara umum, gempa bumi merupakan getaran permukaan tanah yang dapat disebabkan oleh hal – hal berikut :

- a. Aktifitas tektonik
- b. Vulkanik
- c. Tanah longsor
- d. Bahan peledak

Chen dan Lui (2006) menyebutkan bahwa dari semua penyebab tersebut, guncangan yang disebabkan oleh peristiwa tektonik merupakan penyebab utama kerusakan struktur dan perhatian utama dalam kajian bahaya tentang gempa. Gempa bumi dapat terjadi karena fenomena getaran dengan kejutan pada kerak bumi Faktor utama adalah benturan pergesekan kerak bumi yang mempengaruhi permukaan bumi. Gempa bumi ini menjalar dalam bentuk gelombang. Gelombang ini mempunyai suatu energi yang dapat menyebabkan permukaan bumi dan bangunan di atasnya menjadi bergetar. Getaran ini nantinya akan menimbulkan gaya-gaya pada struktur bangunan karena struktur cenderung mempunyai gaya untuk mempertahankan gaya untuk mempertahankan dirinya dari gerakan (Schodek, 1999).

Dari beberapa sumber di atas maka suatu bangunan harus dapat menahan beban lateral berupa beban gempa serta angin dan juga beban gravitasi yang meliputi beban mati dan beban hidup. Mc.Cormak(1995) menyebutkan bahwa hal yang perlu diperhatikan adalah kekuatan bangunan yang memadai untuk memberikan kenyamanan bagi penghuninya teruma lantai teratas. Semakin tinggi bangunan, defleksi lateral yang terjadi semakin besar pula.

Yang harus diperhatikan adalah bahwa struktur mampu memberikan layanan yang sesuai dengan perencanaan. Menurut Paulay (1988), tingkat layanan suatu struktur gaya gempa terdiri dari tiga, yaitu :

- a. *Serviceability*

Jika gempa dengan intensitas percepatan tanah yang kecil dalam waktu ulang yang besar mengenai struktur, disyaratkan tidak mengganggu fungsi bangunan, seperti aktivitas normal didalam bangunan dan perlengkapan yang ada. Artinya

tidak dibenarkan ada terjadi kerusakan pada struktur baik pada komponen struktur maupun dalam elemen non-struktur yang ada. Dalam perencanaan harus diperhatikan kontrol dan batas simpangan (*drift*) yang terjadi saat gempa, serta menjamin kekuatan yang cukup bagi komponen struktur untuk menahan gaya gempa yang terjadi dan diharapkan struktur masih berperilaku elastis.

b. Kontrol kerusakan

Jika struktur dikenai gempa dengan waktu ulang sesuai dengan umur atau masa rencana bangunan, maka struktur direncanakan untuk dapat menahan gaya gempa ringan atau gempa kecil tanpa terjadi kerusakan pada komponen struktur ataupun komponen non- struktur serta diharapkan struktur dalam batas elastis.

c. *Survival*

Jika gempa kuat yang mungkin terjadi pada umur / masa bangunan yang direncanakan membebanin struktur, maka struktur direncanakan untuk dapat bertahan dengan tingkat kerusakan yang besar tanpa mengalami kerusakan dan keruntuhan. Tujuan utama dari batas ini adalah untuk menghindari adanya korban jiwa.

Analisis struktur akibat beban pembebanan gempa cukup sulit digambarkan perilaku strukturnya. Perilaku struktur yang tidak seragam pada tiap – tiap lantainya menghasilkan rotasi horisontal. Hal inilah yang digunakan sebagai acuan penentuan besarnya momen torsi pada tiap elemen struktur sehingga tidak terjadi keruntuhan pada waktu gempa dengan kala ulang yang telah ditentukan.

Suatu element struktur yang mengalami pembebanan akan menunjukkan perilaku atas pembebanan tersebut. Saat elemen struktur ada pada kondisi elastis yaitu mengalami peningkatan linear, besarnya regangan sebanding dengan tegangan. Penambahan beban akan mengakibatkan peningkatan tidak linear sampai pada keruntuhan, kondisi ini adalah kondisi plastis. Tingkat daktilitas struktur sangat berhubungan dengan tingkat kinerja (*performa*), semakin besar tingkat daktilitas struktur maka akan memberikan perpindahan lateral yang semakin besar pula, serta tingkat kinerja struktur menjadi buruk. Tingkat kinerja struktur akan sangat terasa pada saat gempa terjadi dan menyebabkan kerusakan pada subsistem struktur.

Analisis statik non-linear *pushover* merupakan metode yang berdasarkan Desain Gempa Berdasarkan Daya Guna yang mempunyai 2 elemen utama pada prosedur perhitungannya, yaitu gaya gempa sebagai *demand* dan kapasitas struktur sebagai *capacity*. Secara garis besar langkah – langkah yang harus dilakukan pada analisis *pushover* adalah

menentukan besarnya demand dengan kala ulang gempa tertentu serta menghitung kapasitas struktur gedung, dari grafik *demand* dan *capacity* dicari titik dimana kapasitas mampu menahan demand yang diberikan.

Kapasitas, *demand* dan daya guna (*performa*) dalam ATC 40, 1997 secara garis besar adalah:

- **Kapasitas**
Besarnya nilai kapasitas ini sangat tergantung pada kekuatan dan besarnya deformasi dari masing-masing elemen struktur. Pada analisis non-linear kapasitas struktur telah melebihi batas elastisnya hingga mencapai kondisi diambang keruntuhan.
- ***Demand***
Merupakan suatu bentuk pembebanan gempa yang digambarkan dalam bentuk respon spektrum dari suatu pencatatan kejadian gempa pada suatu lokasi tertentu.
- **Daya guna (*performa*)**

Nilai daya guna ini sangat tergantung pada kapasitas struktur yang tersedia untuk mengatasi *demand* yang ada, dengan kata lain struktur harus memiliki kapasitas untuk menahan *demand* dari gempa sedemikian rupa, sehingga daya guna dari struktur sesuai dengan objektivitas desain yang diinginkan.

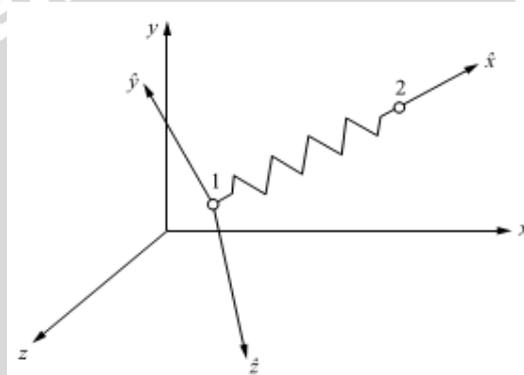
2.2. Analisis Struktur

Pada bangunan simetris ketika diberikan suatu beban gempa maka perpindahan yang terjadi hanya berupa translasi pada arah gempa yang ditinjau. Rotasi yang terjadi pada struktur tidak beraturan akibat adanya perbedaan ketak titik pusat massa dan pusat kekakuan. Besarnya nilai eksentrisitas mempengaruhi besarnya momen torsi yang terjadi pada lantai tersebut. Pada analisis 3 dimensi akan memberikan perpindahan translasi pada arah sumbu-x dan sumbu-y, serta rotasi yang secara langsung terjadi akibat gaya gempa hanya pada salah satu arah saja.

Besarnya massa dan tinggi dari lantai yang ditinjau terhadap titik penjepitan lateral mempengaruhi gaya horisontal pada tiap lantai. Taraf penjepitan lateral merupakan titik penyaluran gerakan tanah akibat gaya gempa yang dipindahkan kepada struktur, dimana titik ini hanya bergerak mengikuti gerakan tanah. Besarnya gaya horisontal pada tiap lantai merupakan kopel momen dari gaya gempa dari taraf penjepitan lateral terhadap tinggi lantai yang ditinjau.

Pada penulisan ini analisis struktur menggunakan bantuan program komputer yaitu ETABS. Analisis yang digunakan dalam program ini adalah metode elemen hingga (*finite elemen method*) yang merupakan perluasan dari metode kekakuan (*stiffness method*). Berikut akan dibahas mengenai metode elemen hingga (*finite elemen method*) dan metode kekakuan (*stiffness method*).

Metode kekakuan mempunyai tingkat analisis yang lebih baik dibandingkan dengan metode gaya (*force method*). Pada metode kekakuan yang tidak diketahui adalah perpindahan titik kumpul struktur. Perpindahan titik kumpul struktur menghasilkan ketidak-tentuan kinematis, dengan begitu dapat dianalisis dengan derajat ketidak-tentuan kinematis yang lebih banyak. Namun pada metode gaya besaran yang tidak diketahui adalah gaya kelebihan yang dipilih secara sembarang.



Gambar 2.1 sistem kordinat lokal ($\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$) dan global (x, y, z)

Secara matematis metode kekakuan meruapakn hubungan gaya dan perpindahan, dapat ditulis:

$$\begin{Bmatrix} \hat{f}_{1x} \\ \hat{f}_{2x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{d}_{1x} \\ \hat{d}_{2x} \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

Gaya node lokal \hat{f}_{1x} dan \hat{f}_{2x} untuk elemen pegas dengan sumbu lokal \bar{x} . Sumbu lokal \bar{x} berperilaku mengarah ke pegas sehingga dapat langsung menghitung perpindahan dan gaya sepanjang pegas. Perpindahan di node lokal adalah \hat{d}_{1x} dan \hat{d}_{2x} untuk elemen pegas. Perpindahan node-node ini disebut dengan derajat kebebasan (*degree of freedom*) di masing-masing node. Arah positif untuk gaya dan perpindahan di setiap node yang diambil dalam arah \bar{x} positif dari node 1 ke node 2 yang ditunjukkan pada gambar. Simbol k disebut konstanta pegas atau kekakuan pegas (Logan, 2007).

Proses *diskritisasi* pada metode elemen hingga (*finite element method*) adalah model unit di bagi-bagi ke dalam unit yang lebih kecil dan saling berhubungan pada titik-titik dengan dua elemen atau lebih dan/atau garis batas dan/atau permukaan. Dengan

menggunakan metode elemen hingga kita mengubah unit yang memiliki jumlah derajat kebebasan tidak berhingga menjadi suatu unit dengan jumlah derajat kebebasan tertentu, dengan begitu pemecahannya akan lebih sederhana.

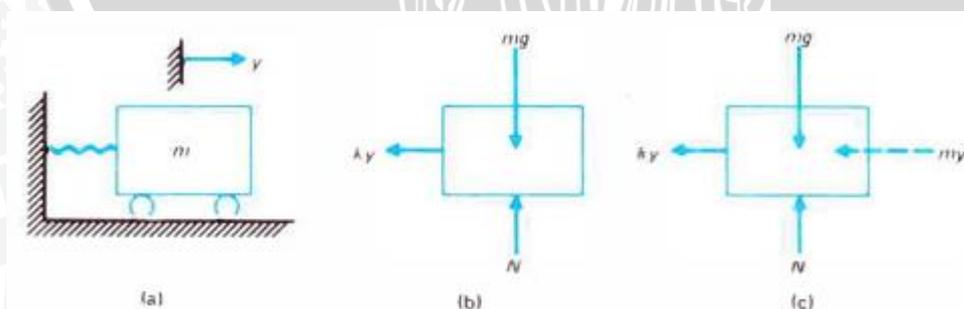
2. 2. 1 Waktu Getar Alami Struktur

Suatu osilator yang diberikan gaya lalu bergetar akan bergerak sesuai dengan gaya yang diberikan, semakin besar gaya yang diberikan maka akan semakin lama untuk osilator kembali ke keadaan semula atau diam. Periode yang diperlukan untuk kembali ke posisi awal akan selalu konstan. Gaya gesek dan gaya redam akan mempengaruhi perubahan amplitudo sampai pada keadaan diam.

Pada sistem berderajat kebebasan satu (*single degree of freedom*) gaya geser atau redaman diabaikan akan ditinjau dari aksi gaya luar selama struktur bergetar. Pada keadaan ini disebut sebagai kondisi awal (*initial condition*) yaitu perpindahan yang diberikan dalam kecepatan pada saat $t = 0$. Pola gerak struktur yang bergetar bebas mempunyai nilai amplitudo konstan pada frekuensi naturalnya. Pada struktur yang bergerak bebas akan memberikan perilaku dinamis berupa frekuensi natural dan perubahan bentuk (*mode shape*). Hukum Gerak Newton kedua dijelaskan tentang hubungan analisis antara perpindahan y dan waktu t yang ditulis dalam notasi.

$$F = ma \quad (2.2)$$

F adalah resultan gaya yang bekerja pada partikel massa m dan a adalah resultan percepatan. *Prinsip d' Alembert* menyatakan bahwa sistem dapat dibuat dalam keadaan keseimbangan dinamis dengan menambahkan sebuah gaya fiktif pada gaya-gaya luar yang biasa dikenal sebagai *gaya inersia* (Paz, 1996).



Gambar 2.2 Beberapa diagram free body : (a) sistem dengan derajat kebebasan satu. (b) Gaya-gaya luar. (c) Gaya-gaya luar dan gaya-gaya inersia.

Penggunaan *Prinsip d' Alembert* digunakan untuk mendapatkan persamaan gerak. Sebagai contoh pada gambar 2.2 dibuat dalam persamaan:

$$m\ddot{y} + ky = 0 \quad (2.3)$$

dengan : m = massa benda
 k = kekakuan pegas
 y = perpindahan
 \dot{y} = kecepatan

Solusi persamaan diatas dilakukan dengan persamaan cara mencoba-coba differensial orde kedua sebagai berikut:

$$y = A \cos \omega t \quad (2.4a)$$

$$y = A \sin \omega t \quad (2.4b)$$

Karena persamaan (2.4a) dan (2.4b) adalah solusi dari persamaan (2.3) dan karena persamaan differensial adalah linear, maka superposisi kedua solusi ini adalah sebagai berikut:

$$y = A \cos \omega t + B \sin \omega t \quad (2.5)$$

Kecepatan \dot{y} didapatkan dengan mendifferensialkan persamaan (2.5) terhadap waktu, yaitu:

$$\dot{y} = -A \omega \sin \omega t + B \omega \cos \omega t \quad (2.6)$$

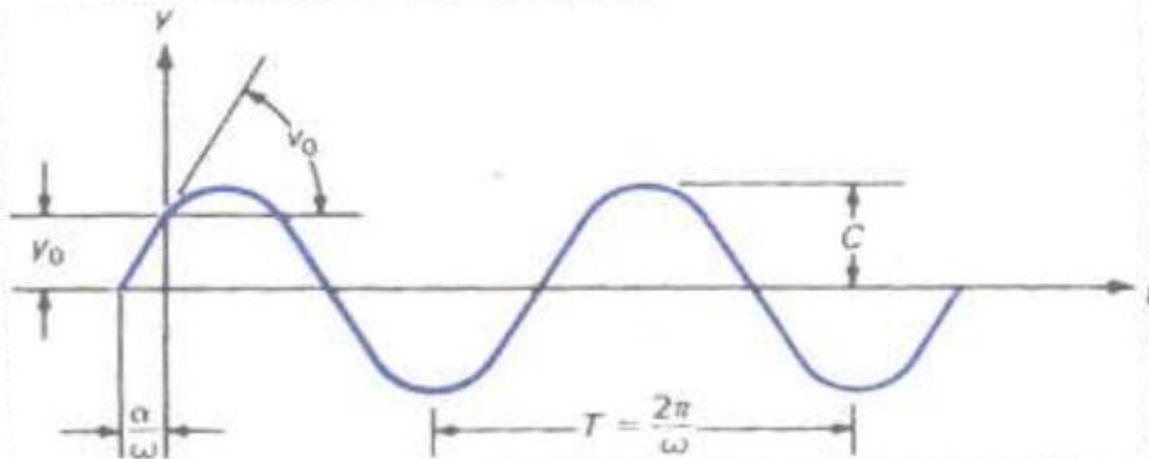
Konstanta A dan B ditentukan dari perpindahan y_0 dan kecepatan v_0 pada kondisi awal yaitu pada saat $t = 0$. Sesudah substitusi harga $y = y_0$ dan $\dot{y} = v_0$ pada saat $t = 0$ pada persamaan (2.2.1.e) didapatkan :

$$y_0 = A \quad (2.7a)$$

$$v_0 = B \omega \quad (2.7b)$$

Jika substitusi konstanta A dan B ke persamaan (2.7) kedalam persamaan (2.5) maka akan menghasilkan:

$$y = y_0 \cos \omega t + \frac{v_0}{\omega} \sin \omega t \quad (2.8)$$



Gambar 2.3 Respon getaran bebas tak teredam

Penentuan frekuensi natural dan pola normal (*normal modes*) dari struktur yang terdiri dari beberapa lantai dengan kekakuan dan massanya masing-masing dengan vektor gaya $\{F\}$ sama dengan nol. Anggapan bahwa tiap lantai dari struktur berupa gumpalan massa dengan kekakuan tiap-tiap antar lantai.

$$[M] \{\ddot{y}\} + [K] \{y\} = \{0\} \quad (2.9)$$

Dengan : $y_i = a_i \sin(\omega t - \alpha)$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$

$$\{y\} = \{a\} \sin(\omega t - \alpha) \quad (2.10)$$

Dengan : a_i = amplitudo gerak dari koordinat ke- i

$[M]$ = matrik massa

$[K]$ = matrik kekakuan

Untuk kolom yang kedua ujungnya terjepit :

$$k = \frac{12EI}{L^3} \quad (2.11)$$

Untuk kolom dengan satu ujungnya terjepit dan ujung yang lain berengsel:

$$k = \frac{3EI}{L^3} \quad (2.12)$$

Permasalahan matematis kumpulan dari sistem aljabar homogen persamaan linear dengan n derajat kebebasan dari besarnya perpindahan a_i yang tidak diketahui dan juga parameter ω^2 . Persamaan (2.11) yang merupakan permasalahan *eigen faktor*. Solusi nontrivialnya dengan tidak semua harga $a_i = 0$, maka diperlukan faktor-faktor matrik $\{a\}$ sama dengan nol.

$$|[K] - \omega^2 [M]| = 0 \quad (2.13)$$

Dari persamaan (2.13) mempunyai bentuk persamaan polynomial derajat n dalam besaran ω^2 . Setiap harga ω^2 yang memenuhi akan disiapatkan nilai-nilai a_1, a_2, \dots, a_n yang merupakan rasio amplitudo dari perpindahan yang terjadi pada struktur. Untuk mencari besarnya *displacement* dapat menggunakan matrik $\{a\}$.

2. 2. 2 Waktu Getar Rayleigh

Metode lain yang digunakan untuk memecahkan keseimbangan dinamis dari sistem yang bergetar adalah dengan prinsip kekekalan energi. Dimana bila tidak ada gaya luar yang bekerja pada sistem dan tidak ada kehilangan energi akibat redaman, maka energi total dari sistem harus konstan selama gerakan.

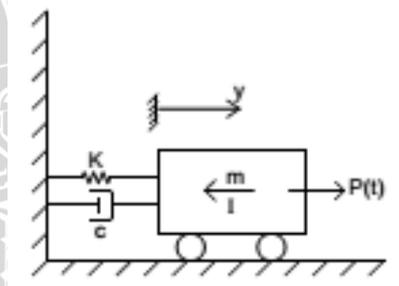
Dengan menyamakan energi kinematis maksimum dengan energi potensial maksimum pada prinsip kekekalan energi maka akan didapatkan frekuensi natural.

$$\omega = \sqrt{\frac{g \sum m_i y_i}{\sum m_i y_i^2}} \quad (2.14a)$$

$$T = 6,3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n W_i y_i}{g \sum_{i=1}^n F_i y_i}} \quad (2.14b)$$

2. 2. 3 Analisis Respon Modal

Untuk menentukan besarnya respon struktur terhadap beban gempa yang diberikan digunakan analisis respon modal. Akan didapatkan besarnya gaya horisontal pada struktur dengan berbagai mode. Analisis modal pada sistem dengan derajat kebebasan yang banyak (*multi degree of freedom*) menggunakan persamaan gerak :



Gambar 2.4 Sistem dengan derajat kebebasan satu

$$M \ddot{y} + c \dot{y} + k y = P(t) \quad (2.15)$$

$P(t)$ merupakan gaya luar pada struktur, sedangkan parameter lain pada bab sebelumnya telah dijelaskan. Pada analisis respon modal nilai redaman (*damping*) tidak dibutuhkan karena nilai redaman dapat dicari dengan analisis *pushover*. Dari respon riwayat waktu (*time history*) dan respon spektra didapatkan analisis modal.

Besarnya perpindahan y didapatkan dari koordinat modal yang telah dinormalisasikan. Jika mode ke- r dipadukan dengan mode ke- n maka persamaan gerak dinamisnya menjadi:

$$q_n + 2 \zeta_n \omega_n q_n + \omega_n^2 q_n = \Gamma_n P_n(t) \tag{2.16}$$

$$\Gamma_n = \frac{L_n}{M_n} \tag{2.16a}$$

$$L_n = \phi_n^T m l \tag{2.16b}$$

$$M_n = \phi_n^T m \phi_n \tag{2.16c}$$

dengan : M_n = matrik diagonal massa

K_n = matrik diagonal kekakuan

C_n = damping

m = unit massa

l = vektor gaya

Γ_n = faktor partisipasi modal

Untuk mendapatkan respon dari struktur perlu adanya kombinasi gaya-gaya pada masing-masing mode dengan analisis respon spektra. Berdasarkan SNI-1726-2012 pada pasal 7.9.3 nilai untuk masing-masing parameter yang ditinjau untuk berbagai ragam harus dikombinasikan dengan metode akar kuadrat jumlah kuadrat (SRSS) atau metode kombinasi kuadrat lengkap (CQC). Metode CQC hanya digunakan untuk masing-masing nilai ragam dimana berjarak dekat mempunyai kolerasi silang yang signifikan diantara respon translasi dan torsi.

Kombinasi respon untuk metode SRSS :

$$\Gamma_O = \sqrt{\sum_{n=1}^N r_{no}^2} \tag{2.17}$$

Kombinasi respon untuk metode CQC :

$$\Gamma_O = \sqrt{(\sum_{n=1}^N r_{no}^2) + (\sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^N r_{io} r_{no} \rho_{in})} \tag{2.18}$$

Dengan : r_o = respon puncak pada struktur

r_{no} = respon pada mode ke-n

ρ_{in} = koefisien cross-corelation pada mode ke-i dan ke-n

2.3. Kinerja Struktur

Kinerja dari struktur yang mendapatkan beban dapat dijelaskan dengan konsep *Performance Based Design* dan *Strength Based Design* dibahas sebagai berikut:

2.3.1 *Strength Based Design*

Dengan menggunakan metode desain kapasitas yaitu dengan memanfaatkan sifat daktail struktur maka pola keruntuhan struktur dapat dikendalikan. Pendekatan ini mengandalkan kekuatan, kekakuan, dan daktilitas. Dengan merencanakan letak sendi plastis pada struktur maka pola keruntuhan struktur daktail dapat dikontrol. Dengan begitu tidak membahayakan komponen struktur yang lain.

Analisis linear dengan metode *strength based design* hanya bekerja pada daerah elastis dari elemen struktur. Pada analisis linear tidak dapat menampilkan fenomena-fenomena penting untuk mengontrol daya guna struktur saat gempa kuat yang dapat menyebabkan struktur tidak dapat bersifat elastis lagi. Jika struktur sudah mencapai kapasitas dan muncul sendi plastis kemudian akan hancur perilaku adalah perilaku non-linear.

Dua macam batasan kinerja struktur dalam konsep *strength based design* (Paulay, 1992) adalah sebagai berikut :

- Serviceability Limite State

Titik berat dari kriteria ini adalah pengontrolan dan pembatasan *Displecement* yang terjadi selama gempa berlangsung. Kerusakan-kerusakan minor pada elemen non-struktural masih diijinkan, tetapi tidak diperkenankan terjadi kelelahan tulangan elemen struktur.

- Survival Limite State

Prinsip utama dari kriteria ini adalah sedapat mungkin mencegah kehilangan nyawa manusia, ketika terjadi gempa yang paling kuat. Struktur yang mengalami perpindahan lateral yang besar harus tetap mampu menahan beban gravitasi dengan mempertahankan kehilangan kekuatannya, sehingga perpindahan lateralnya sekecil mungkin.

Konsep *strength based design* hanya memperhatikan tingkat kinerja struktur pada kondisi elastis lalu kemudian runtuh. Maka dari itu konsep ini tidak dapat menggambarkan kondisi inelastis sebelum runtuh. Untuk mengetahui tingkat kinerja non-linear pada bangunan tahan gempa perlu menggunakan konsep *performance based design*.

2. 3. 2 *Performance Based Design*

Metodologi yang berdasarkan pada *performance based design* adalah kriteria desain dan evaluasi yang diekspresikan sebagai objektivitas dari daya guna struktur. Hal tersebut dapat menetapkan berbagai 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, dengan kesepakatan ini antara pemilik bangunan (*owner*) dan perencana. Tujuan utama dari *performance based design* adalah menciptakan bangunan yang tahan gempa dengan gaya guna yang dapat diperkirakan.

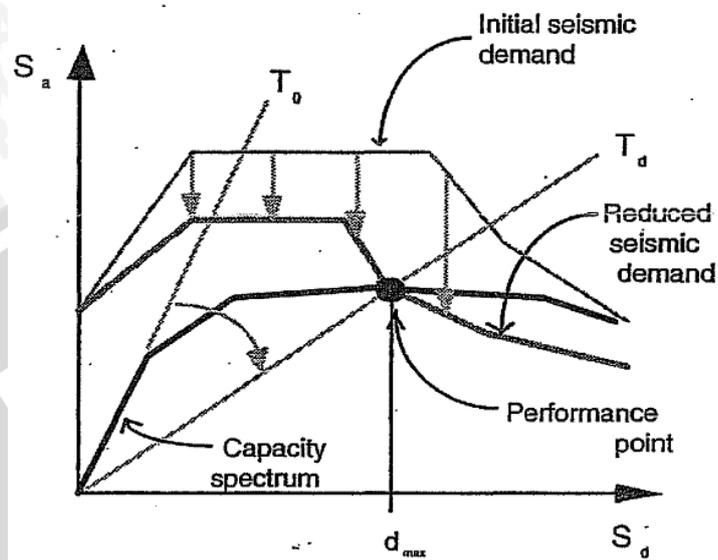
Performance based engineering adalah definisi yang terdiri dari pemilihan kriteria desain, proporsi dan detailnya untuk komponen struktur dan non-struktur serta kandungan, serta asuransi dan kontrol kualitas dari pembangunan dan biaya pemulihan, seperti spesifikasi level dari semua penambahan semua gaya (bisa terjadi pada bangunan) dan dengan definisi level dari hal yang terpercaya, bangunan atau fasilitas tidak akan membahayakan yang melebihi daerah batas. PBE adalah proses dimana mulai dari pertama pembangunan sampai terakhir seluruhnya dari umur bangunan. *Performance based engineering* mempunyai dua elemen utama dalam perencanaannya yaitu, kapasitas struktur (*capacity*) dan beban (*demand*). Pergerakan tanah akibat gempa yang digambarkan sebagai kurva respon spektrum sebagai beban (*demand*). Kemampuan struktur untuk menanggulangi gaya gempa tanpa mengalami kerusakan disebut sebagai kapasitas struktur (*capacity*).

Performance based seismic engineering adalah aplikasi dari PBE untuk kasus desain kontrol resiko gempa. Dengan begitu PBSE melibatkan disain seluruhnya, pembangunan, kontrol dari perbaikan, dan fungsi dari bangunan untuk memastikan bahwa pembangunan akan menolak efek dari pergerakan tanah dalam memutuskan tingkat kerusakan yang dimaksud.

Performance Based Seismic Design adalah salah satu aktivitas dari PBSE dalam fokus ke proses disain. Dengan demikian ini termasuk indentifikasi dari bahaya gempa, pemilihan dari level kinerja dan desain kinerja objek, penentuan dari kesesuaian site, konsep desain, desain awal numerik, desain akhir, penerimaan selama desain, mengulang desain, spesifikasi kualitas asuransi selama pembangunan dan monitoring pemeliharaan selama bangunan digunakan. Dalam konteks ini desain diaplikasikan untuk semua sistem bangunan termasuk pondasi, komponen non-struktural, isi, peralatan, dan garis utilitas fasilitas.

Salah satu analisis yang dapat digunakan untuk menggabungkan kapasitas struktur adalah analisis *pushover*. Dengan mencari titik perpotongan antara kurva *demand* dan kurva

capacity maka akan didapatkan *performance point*. *Performance point* merupakan estimasi dimana kapasitas struktur mampu menahan beban (*demand*) yang diberikan. Dari titik kinerja (*performance point*) dapat diketahui tingkat kerusakan struktur berdasarkan perpindahan lateralnya (*drift*).



Gambar 2.5 kurva *demand* dan *capacity* (ATC 40)

Asian Concrete Model Code (ACMC) adalah suatu standar yang diharapkan dapat memberikan standarisasi terhadap berbagai macam standar negara-negara di wilayah Asia. Sesuai dengan tujuan desain gempa berdasarkan daya guna (*Performance Based Seismic Design*) yaitu penetapan tingkat kinerja struktur dari berbagai tingkat intensitas gempa dengan beberapa kondisi batas rencana, ACMC menetapkan tiga tingkatan intensitas gempa dengan rentang periode ulang gempa yang dapat disesuaikan, tergantung kepada fungsi dan umur efektif bangunan, yaitu :

- Gempa kecil sampai sedang (*Minor to Moderate Earthquake*) dengan periode ulang 20 – 200 tahun. Gempa ini dapat terjadi beberapa kali selama umur efektif bangunan.
- Gempa kuat (*Severe Earthquake*) dengan periode ulang 500 tahun. Gempa ini dapat terjadi selama umur efektif bangunan.
- Gempa kuat (*Ultimate Earthquake*) dengan periode ulang 1000 tahun atau lebih. Gempa ini terjadi pada lokasi bangunan yang berada pada kawasan rawan gempa.

ACMC menetapkan tiga kondisi batas yang dapat disesuaikan oleh perencana struktur sebagai dasar untuk memeriksa dan mengevaluasi kinerja bangunan terhadap gempa. Masing-masing batas harus memiliki beberapa kriteria penilaian, seperti (*Damage Index*), batasan simpangan antar tingkat (*drift*) dan sebagainya. Tiga kondisi batas ACMC tersebut adalah :

1. Batas pelayanan (*Serviceability limite state*)

Pada batasan ini fungsi bangunan dapat dipertahankan, dalam arti aktivitas - aktivitas yang ada pada bangunan masih tetap berfungsi. Kerusakan yang terjadi hanya pada elemen – elemen non struktural saja. Selain itu, tidak terjadi sendi plastis pada elemen struktur yang

2. Batas kontrol kerusakan (*Damage control limite state*)

Pada batas ini kerusakan yang terjadi pada daerah sendi plastis dan dalam kondisi yang dapat diperbaiki. Untuk daerah yang berada diluar sendi plastis tidak mengalami kelelahan, sedangkan elemen-elemen struktur yang ada tidak mengalami kegagalan geser.

3. Batas keamanan (*safety limite state*)

Pada batasan ini kehilangan ketahanan struktur turun secara drastis didalam memikul beban lateral tidak terjadi dan integrasi struktur untuk memikul gravitasi masih efektif, tetapi struktur sudah tidak dapat dipakai lagi.

Sebuah konsep rangka untuk PBSE telah dikembangkan yang meliputi berbagai ilmu rekayasa gempa dalam mendesain struktur untuk memprediksi kinerja dan kontrol kinerja gempa dengan tingkat risiko. Langkah pertama adalah pemilihan dari objek kinerja. Objek – objek ini dipilih dan digambarkan dalam tingkatan yang diharapkan dari kerusakan akibat pergerakan tanah yang diinginkan.

Tingkat kinerja merupakan pembeda dalam spektrum kerusakan struktural dan elemen non-struktural beserta isinya, juga mempertimbangkan konsekunsi dari kerusakan bagi penghuni serta fasilitasnya. Empat tingkatan kinerja yang digambarkan pada Gambar 2.6. Bahaya gempa ditempat – tempat tertentu diwakilkan sebagai suatu pergerakan tanah akibat gempa dan bahaya yang terkait dengan spesifikasi probabilitas terjadinya. Misalnya istilah ‘gempa langka’ mengacu pada potensi pergerakan tanah yang dapat menghasilkan tingkat kerusakan dengan spesifikasi tertentu pada frekuensi tahunan.

		EARTHQUAKE PERFORMANCE LEVEL			
		Fully Operational	Operational	Life Safety	Near Collapse
EARTHQUAKE DESIGN LEVEL	Frequent (43 years)				
	Occasional (72 years)				Unacceptable Performance (for new construction)
	Rare (475 years)				
	Very Rare (970 years)				

Diagram illustrating the Earthquake Performance Level matrix. The matrix is a 4x4 grid. The columns represent performance levels: Fully Operational, Operational, Life Safety, and Near Collapse. The rows represent earthquake design levels: Frequent (43 years), Occasional (72 years), Rare (475 years), and Very Rare (970 years). A diagonal line with arrows pointing from the top-left to the bottom-right is labeled 'SAFETY CRITICAL OBJECTIVE'. A dashed diagonal line is labeled 'ESSENTIAL OBJECTIVE'. A solid diagonal line is labeled 'BASIC OBJECTIVE'. The cell for Occasional (72 years) and Near Collapse is shaded and labeled 'Unacceptable Performance (for new construction)'.

Gambar 2.6 Rekomendasi minimum untuk desain kinerja gempa untuk bangunan.

ATC 40 menjelaskan detail tentang kinerja objek gempa dan bagaimana terbentuknya. Definisi atau deskripsi pada daerah kerusakan permanen dengan termasuk penjelasan desain berbasis kinerja yang dibagi dalam enam level kinerja pada elemen struktural, yaitu:

- ❖ SP – 1 *Immedite Occupancy*
- ❖ SP – 2 *Damage Control*
- ❖ SP – 3 *Life Safety*
- ❖ SP – 4 *Limited Safety*
- ❖ SP – 5 *Collapse Prevention*
- ❖ SP – 6 *Not Considered*

Dan ada lima level kinerja untuk elemen non-struktural, yaitu:

- NP – A , *Operational*
- NP – B , *Immedite Occupancy*
- NP – C , *Life Safety*
- NP – D , *Hazard Reduced*
- NP – E , *Not Considered*

Level kinerja untuk bangunan telah dibentuk dengan kombinasi element struktural dan elemen non-struktural level kinerjanya menjelaskan sebuah bangunan utuh dengan daerah kerusakannya. Kinerja objek adalah dibuat dengan kombinasi level kinerja bangunan yang diinginkan serta pergerakan tanahnya. Pada bagian ini dijelaskan proses dari pemilihan tujuan kinerja yang sesuai dan satu standart kinerja objek, yang biasa disebut keselamatan tujuan dasar yang telah disebutkan.

2. 3. 2. 1 SP – 1 , *Immedite Occupancy*

Kinerja struktur level S – 1 adalah immedite occupancy atau segera huni, yang didefinisikan setelah gempa berlangsung daerah kerusakan masih tetap aman untuk ditempati, pada dasarnya mempertahankan kekuatan desain setelah gempa dan kekauan struktur sesuai dengan kriteria yang telah ditetapkan. Pada dasarnya gaya verikal dan gaya horisontal menolak sistem yang cenderung mempertahankan kekakuannya setelah gempa. Risiko cedera yang mengancam akibat dari kerusakan struktural sangat rendah, meskipun beberapa perbaikan kecil pada struktural mungkin dibutuhkan, ini biasanya tidak diperlukan karena bangunan sudah bisa langsung dihuni kembali.

2. 3. 2. 2 SP – 2, *Damage Control*

Kinerja struktural di level S – 2 adalah damage control atau kontrol kerusakan, yang didefinisikan sebagai kerusakan antara level kinerja S – 3 *Life Safety* atau keselamatan hidup dan level kinerja S – 1 *Immediate Occupancy* atau segera huni. Desain untuk kontrol kerusakan adalah kisaran yang mungkin diinginkan untuk meminimalkan waktu perbaikan dan gangguan operasi sebagai sarana parsial untuk melindungi peralatan berharga beserta isinya, atau untuk melestarikan fitur bersejarah penting ketika biaya desain untuk dihuni kembali cukup besar.

2. 3. 2. 3 SP - , *Life Safety*

Kinerja struktural di level S – 3 adalah *Life Safety* atau keselamatan hidup, yang didefinisikan setelah gempa terjadi termasuk kerusakan komponen struktural tetapi masih mempertahankan batas terhadap timbulnya keruntuhan parsial atau keruntuhan total yang masih dalam batas yang ditetapkan dalam standart untuk level kinerja struktural ini.

Kinerja struktur level S – 3 atau keselamatan hidup berarti kerusakan pasca gempa adalah kerusakan dalam struktur telah terjadi tetapi beberapa batas keruntuhan total atau keruntuhan parsial masih dapat diterima. Beberapa elemen struktur rusak berat tetapi tidak mengakibatkan jatuhnya puing – puing besar baik diluar bangunan maupun di dalam bangunan. Cedera dapat terjadi selama gempa namun risiko yang mengancam jiwa akibat dari kerusakan struktur menjadi sangat rendah. Dengan begitu mungkin dibutuhkan perbaikan struktur namun hal ini tidak lah praktis. Selagi struktur yang rusak bukanlah risiko runtuh akan lebih baik jika menggunakan bracing sementara sebelum kembali dihuni.

2.3.2.4 SP – 4, *Limited Safety*

Kinerja struktur level S – 4 adalah *Limited Safety* atau keamanan terbatas, yang didefinisikan sebagai kerusakan antara level S – 3 *Life Safety* atau keselamatan hidup dan S – 5 *collapse prevention* atau pencegahan runtuh.

2.3.2.5 SP – 5, *Collapse Prevention*

Kinerja struktur level S – 5 adalah pencegahan keruntuhan, yang didefinisikan sebagai keadaan pasca gempa yang meliputi kerusakan pada komponen struktural seperti struktur yang berfungsi sebagai penahan beban gravitasi tetapi tetap ada batasan runtuhnya sesuai dengan standart yang telah ditetapkan Level Kinerja Struktur.

Kinerja struktur level S – 5 yaitu pencegahan keruntuhan berarti kerusakan pasca gempa dinyatakan dalam batas runtuh parsial atau runtuh total. Kerusakan besar pada struktur mungkin terjadi termasuk penurunan yang signifikan pada kekuatan dan kekakuan penahan gaya lateral, besar deformasi lateral struktur sudah sampai batas yang telah diijinkan dalam menahan beban vertikal. Risiko cedera karena jatuhnya puing – puing struktural mungkin ada. Struktur tidak mungkin dapat diperbaiki dan tidak aman untuk kembali dihuni, seperti aktivitas gempa susulan yang bisa menginduksi runtuhnya.

2.3.2.6 SP – 6, *Not Considered*

Kinerja bangunan yang tidak membahas struktur harus diksifikasikan sebagai kinerja strktur yang tidak dipertimbangkan. Beberapa pemilik mungkin ingin mengatasi kerentanan non-struktural dengan program rehabilitasi seperti menguatkn parapet untuk penyimpanan bahan berbahaya tanpa menyikapi kinerja itu sendiri. Program rehabilitasi mendapatkan penurunan yang signifikan dalam risiko gempa dengan biaya yang relatif murah.

2.3.2.7 NP – A, *Operational*

Kinerja non-struktural tingkat N – A *Operational*, didefinisikan sebagai keadan kerusakan pasca gempa dimana komponen non-struktural yang mampu mendukung fungsi dari gedung. Pada tingkatan ini, kebanyakan sistem non-struktural diperluka untuk penggunaan normal seperti plumbing, HVAC, pencahayaan dan sistem komputer yang berfungsi, meskipun pembersihan minor dan perbaikan beberapa item diperlukam. Tingkat kinerja non – struktural pada level ini membutuhkan pertimbangan selian insinyur struktur. Selain menyakini bahwa komponen non – struktural dipasang dengan benar dan siap dalam struktur, namun teteap diperlukan utilitas darurat. Ini juga diperlukan untuk melakukan uji

kualifikasi dari mekanika dan electrical berfungsi selama atau setelah guncangan kuat. Penggunaan yang ingin merancang tingkat kinerja ini perlu merujuk ke kriteria yang sesuai untuk memastikan kinerja mechanical dan electrical dapat bekerja dengan baik.

2. 3. 2. 8 NP – B, *Immedite Occupancy*

Kinerja non-struktural level N – B yaitu segera huni didefinisikan sebagai kerusakan pasca gempa dengan kerusakan meliputi kerusakan komponen non-struktural, tetapi akses bangunan dan keselamatan hidup termasuk sistem lift, tangga, pencahayaan darurat, alarm kebakaran tetap beroperasi selama daya tersedia.

Kerusakan jendela kecil dan kerusakan ringan bisa terjadi pada beberapa komponen. Asumsi bahwa bangunan secara struktural aman, penghuni aman saat tetap berada di dalam bangunan, meskipun perlu ada beberapa pembersihan. Secara umum, komponen mechanical dan electrical di gedung secara struktural harus tetap berfungsi. Namun, beberapa komponen mungkin mengalami kerusakan internal dan tidak dapat beroperasi. Listrik, air, gas alam, jalur komunikasi dan utilitas lain yang diperlukan untuk penggunaan bangunan secara normal mungkin tidak tersedia. Risiko cedera yang mengancam akibat kerusakan non-struktural sangatlah kecil.

2. 3. 2. 9 NP – C, *Life Safety*

Kinerja non - struktural level C adalah keselamatan hidup, didefinisikan sebagai kerusakan pasca gempa dengan tingkat kerusakan yang signifikan tetapi belum terjadi runtuh dan mengancam keselamatan jiwa baik di dalam gedung maupun di luar gedung. Rute jalur evakuasi tidak terblockir hanya HVAC, pipa, sistem pencegah kebakaran telah rusak yang menyebabkan hilangnya fungsi. Sementara cedera dapat terjadi selama gempa karena kegagalan komponen non – struktural, secara keseluruhan risiko cedera mengancam jiwa sangatlah rendah.

2. 3. 2. 10 NP – D, *Hazard Reduced*

Kinerja non – struktural level D adalah mengurangi bahaya, kerusakan pasca gempa dimana kerusakan yang luas telah terjadi untuk komponen non – struktural tetapi barang – barang besar atau berat yang menimbulkan risiko jatuh seperti rak penyimpanan, parapets, panel cladding, dapat dicegah. Sementara cedera serius terisolasi seperti kegagalan yang dapat melukai banyak orang dapat dihindari baik di dalam gedung maupun diluar gedung.

Kerusakan komponen non – struktural yang kecil dan ringan tidak harus menyebabkan cedera serius. Komponen non – struktural yang lebih besar cenderung bisa runtuh, arti dari mengurangi bahaya pada level ini adalah untuk mengatasi bahaya non - struktural yang signifikan tanpa perlu adanya rehabilitasi semua komponen non – struktural dalam gedung. Bila menggunakan tingkat kinerja ini umumnya akan sesuai dengan mempertimbangkan kinerja life safety atau keselamatan hidup yang paling berbahaya, bagian risiko tertinggi komponen non – struktural di gedung.

2. 3. 2. 11 NP – E, *Not Considered*

Tingkat kinerja non – struktural level E adalah *not considered* atau tidak dipertimbangkan. Dalam beberapa kasus merehabilitasi struktur dapat dilakukan tanpa mengatasi kerentanan komponen non – struktural. Hal ini dilakukan tanpa gangguan sistem operasi bangunan. Banyak dari bahaya keselamatan hidup yang paling parah akibat dari kerentanan struktural, beberapa kota mengadopsi merehabilitasi cara komponen struktural saja.

2.4. *Pushover Analysis*

Analisis statik non linear *pushover* (ATC 40, 1997) merupakan salah satu komponen *Performance Based Design* yang bertujuan untuk mencari kapasitas suatu struktur. Dasar analisis dilakukan dengan peningkatan beban statik tertentu dalam arah lateral yang nilainya ditingkatkan berangsur – angsur (*incremental*) secara proposional pada struktur hingga mencapai target *displacement* atau mencapai mekanisme diambang 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*.

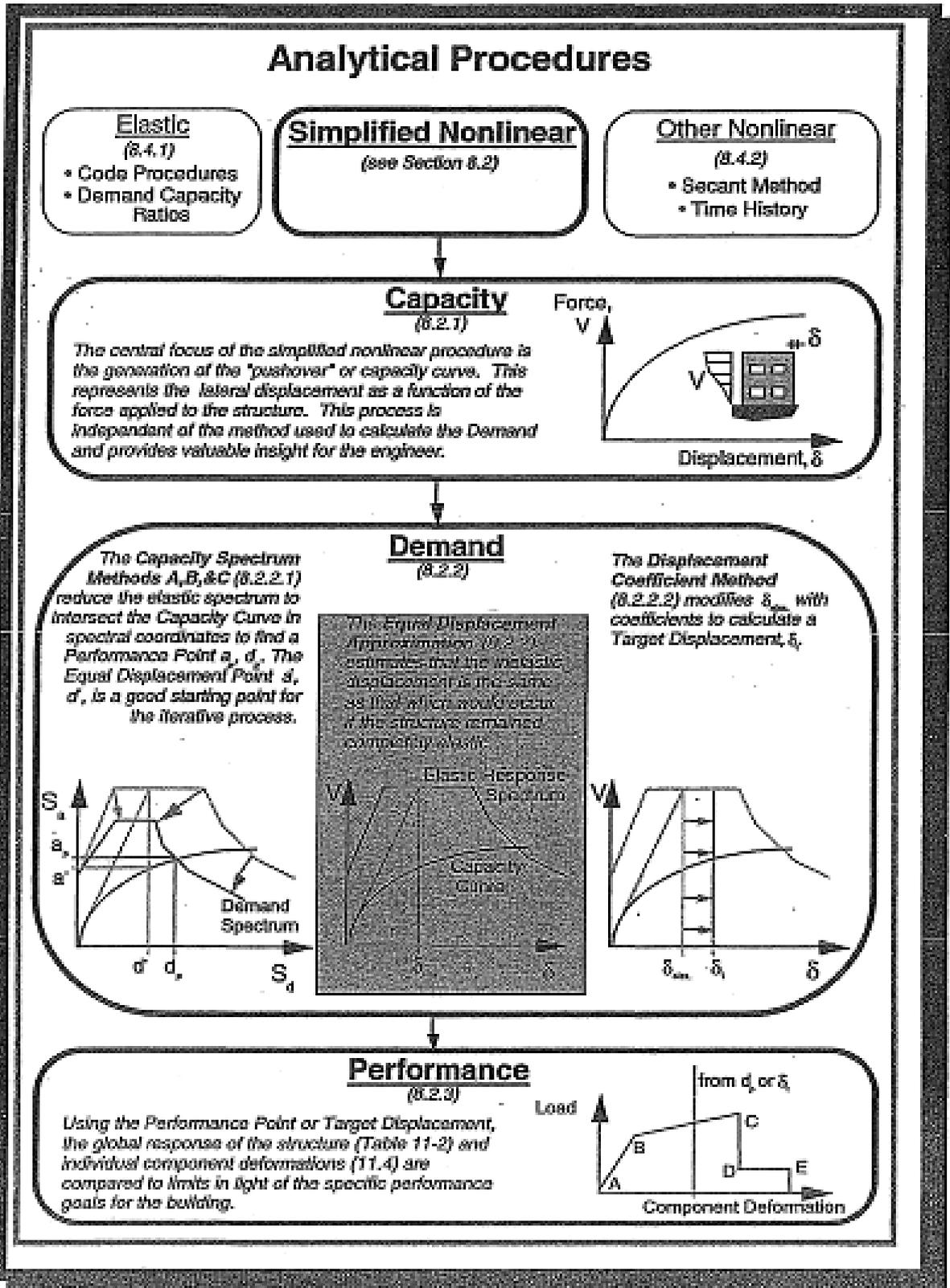
Hasil akhir dari analisis ini berupa nilai – nilai gaya geser dasar (*base shear*) untuk menghasilkan perpindahan dari struktur tersebut. Nilai – nilai tersebut akan digambarkan dalam bentuk kurva kapasitas yang merupakan gambaran perilaku struktur dalam bentuk perpindahan lateral terhadap beban (*demand*) 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.

Pada analisis *pushover* ini mode yang akan digunakan adalah mode pertama. Analisis yang menggunakan mode – mode yang lebih tinggi menghasilkan analisis yang lebih akurat

dalam menggambarkan perilaku struktur, tetapi untuk mendapatkan dibutuhkan variabel dan data yang rumit, selain itu masih sangat sedikit analisis yang bisa digunakan untuk mendapatkan nilai ragam yang lebih tinggi. Tidak merubah struktur yang ada, berdasarkan analisis Benjamin lumantara, iksan gunawan, dan eka wijaya (2004).

Prosedur perhitungan dengan anlisi *pushover* berdasarkan ATC 40 (1997) adalah sebagai berikut :

1. Pembuatan model 3 dimensi dengan ETABS V.97
2. Penentuan suatu kriteria performance seperti batas ijin simpangan pada atap.
3. Pembebanan struktur dengan gaya gravitasi.
4. Pembebanan struktur dengan beban gempa statik tertentu yang didapatkan dari standar yang berlaku di masing – masing negara.
5. Penentuan titik kontrol (*control joint*) untuk memantau perpindahan, biasanya pada puncak struktur.
6. Struktur didorong (*push*) dengan pola pembebanan yang telah ditentukan sebelumnya secara bertahap (*incremental*) sampai mencapai keruntuhan suatu target peepindahan tertentu.
7. Penggambaran kurva kapasitas, yaitu kurva hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dan besarnya perpindahan lateral (*displecement*).



Gambar 2.7 Prosedur analisis kinerja (ATC 40, 1997)



Langkah – langkah *Pushover Analysis* :

2. 4. 1 Prosedur menentukan *Capacity*.

Seperti yang dijelaskan diatas bahwa kapasitas struktur terhadap pembebanan arah lateral digambarkan lewat kura kapasitas yang merupakan hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dan simpangan lateral atap (*roof displacement*). Kurva kapasitas didapatkan dengan melakukan running program ETABS sebanyak 2 kali. Yaitu running analisis statik dan running analisis *pushover*.

Langkah – langkah analisis ETABS adalah sebagai berikut :

- a. Memberi pembebanan lateral tiap tingkat pada struktur yang polanya sesuai dengan peraturan yang berlaku.
- b. Menghitung gaya – gaya dalam pada elemen – elemen struktur (beban gravitasi ikut dimasukan)
- c. Memperbesar beban lateral tersebut secara terus – menerus (*incremental*) sampai beberapa elemen atau kelompok elemen seperti *joint*, *strut* pada *braced frame* atau *shear wall* sampai mencapai tegangan lelehnya.
- d. Mencatat besarnya *base shear* dan simpangan lateral atap yang terjadi.
- e. Merevisi model struktur dengan memberikan *stiffness* yang sangat kecil untuk elemen – elemen yang leleh.
- f. Memberikan beban lateral dengan *increment* yang baru pada struktur yang sudah direvisi sedemikian hingga ada elemen atau grup elemen lain yang leleh.
- g. Menambahkan *increment* beban lateral dan *displacement* atap akumulatif dengan sebelumnya, sehingga diperoleh akumulasi *base shear* dan *roof displacement*.

2. 4. 2 Prosedur menentukan *demand*

Berdasarkan ATC 40 terdapat dua metode untuk menentukan *demand*, yaitu :

a. *Capacity spectrum method*

- Merupakan metode *iterative* yang bertujuan untuk menentukan lokasi titik *performance* struktur dengan kapasitas yang ada dan *demand* yang diminta.
- Lokasi *performance point* harus memenuhi dua kriteria, yaitu :
 1. Berada pada kurva spektrum kapasitas.
 2. Berada pada kurva *demand spectral* yang telah direduksi dari keadaan elastis (damping 5%).

- Ada tiga macam prosedur yang dapat dipilih dalam metode ini :
 1. Prosedur A : digunakan oleh pemula karena paling mudah digunakan dalam *spreadsheet* dan paling mudah dipahami, merupakan cara analisis berdasarkan rumusan – rumusan tertentu.
 2. Prosedur B : melakukan penyederhanaan bilinear pada kurva kapasitas sehingga cara ini relative sedikit iterasinya.
 3. Prosedur C : murni grafis sehingga paling tepat untuk penyelesaian manual tanpa *spreadsheet*.

b. *Displacement coefficient method*

- Metode dengan proses numeric langsung dalam menghitung *displacement demand* sehingga tidak perlu mengkonversi kapasitas kedalam koordinat spectral.

Dalam penulisan ini digunakan **Metode Spektrum Kapasitas Prosedur B**. *Performance point* yang diperoleh pada metode B bisa langsung didapatkan dalam program ETABS, dimana prosedur ini akan dibahas setelah Prosedur A yang mempunyai pemahaman lebih mudah. Prosedur A digunakan sebagai kontrol dari pemakaian Prosedur B dengan program ETABS.

A. Langkah – langkah yang harus dilakukan pada prosedur A adalah sebagai berikut :

1. Merubah kurva kapasitas kedalam koordinat spektral menjadi kurva spektrum kapasitas dengan rumus :

$$S_a = \frac{v}{\alpha_1} \quad (2.19a)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1 \phi_{roof}} \quad (2.19b)$$

Dengan :

$$\alpha_1 = \frac{[\sum_{i=1}^N \frac{w_i \phi_{li}}{g}]^2}{[\sum_{i=1}^N \frac{w_i}{g}][\sum_{i=1}^N \frac{w_i \phi_{li}^2}{g}]} \quad (2.20a)$$

$$PF_i = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{w_i \phi_{li}}{g}}{\sum_{i=1}^N \frac{w_i \phi_{li}^2}{g}} \quad (2.20b)$$

Dengan :

S_a = percepatan spektral (*spektral acceleration*)

S_d = perpindahan spektral (*spektral displacement*)

PF_1 = faktor partisipasi moda (*modal participation factor*) untuk moda pertama

α_1 = koefisien massa moda (*modal mass coefficient*) untuk moda pertama

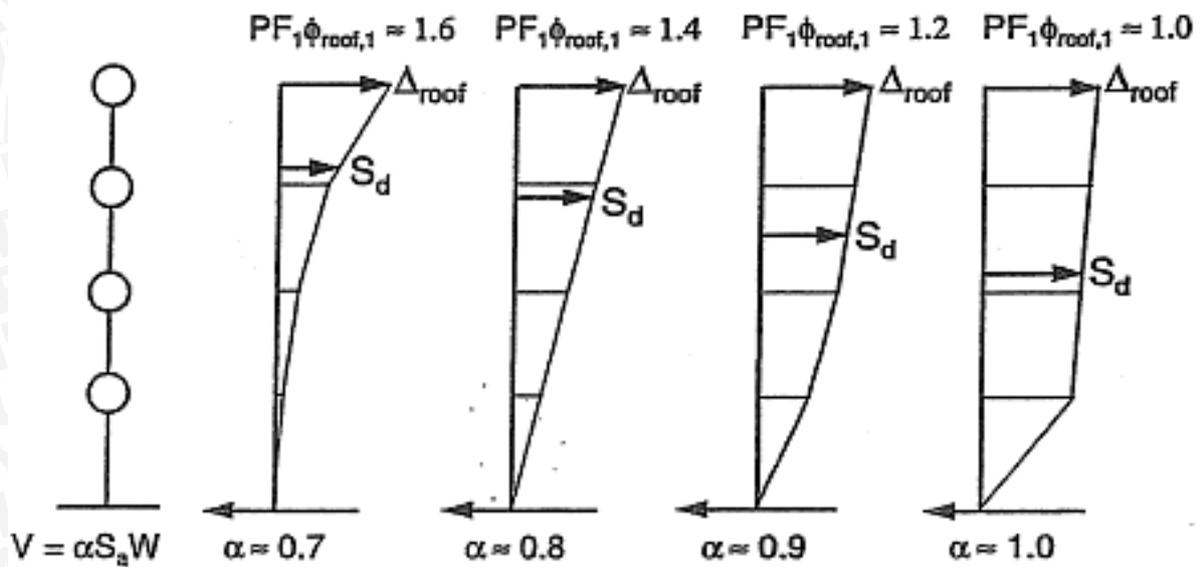
ϕ_{1i} = amplitudo moda (*amplitude of mode*) pertama pada level i

V = gaya geser dasar (*base shear*)

W = beban gravitasi

Δ_{roof} = perpindahan pada atap (*roof displacement*)

$\frac{W_i}{g}$ = massa pada level i



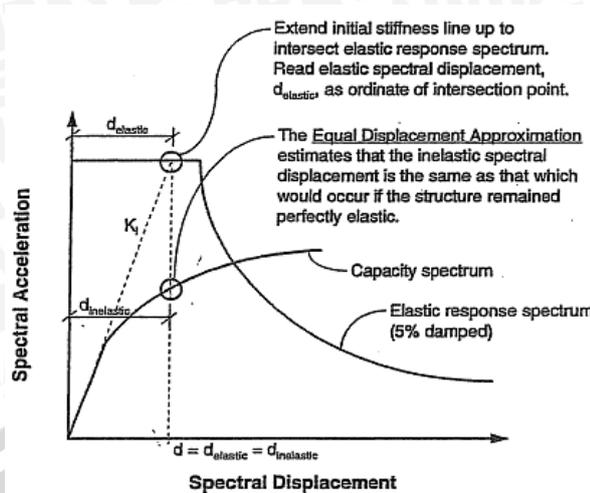
Gambar 2.8 contoh faktor partisipasi massa dan koefisien modal massa

- Menentukan spektrum respon elastis (damping 5%) sesuai dengan peraturan yang berlaku, kemudian mengkonversi dalam koordinat spektral dengan rumus :

$$S_d = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 S_a \quad (2.20b)$$

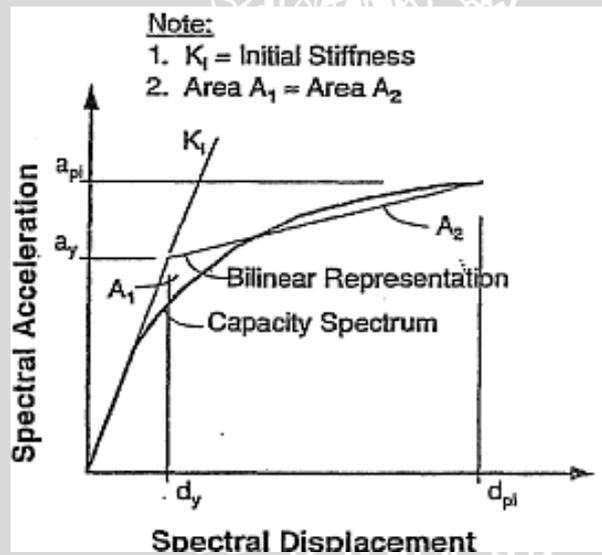
Menentukan titik trial pertama (d_{p1} , a_{p1}) (pendekatan *equal displacement*) :

- Perpanjangan garis *stiffness* awal pada kurva spektrum kapasitas sampai memotong *demand spectral*.
- Equal displacement approximation* memperkirakan bahwa *displacement spectral inelastik* sama dengan yang terjadi pada struktur jika struktur tetap elastis sempurna. Langkah 1 – 3 digambarkan dalam Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Equal Displacement Approximation

- Menentukan representasi Bi – Linear guna memprakirakan besarnya *damping* efektif dan reduksi yang tepat untuk *demand* spektral dengan cara menarik garis *trial* pertama (d_{p1}, a_{p1}) memotong *initial stiffness* (d_y, a_y) sehingga luasan daerah A_1 sama dengan A_2



Gambar 2.10. Representasi Bi – linear pada metode spektrum kapasitas (ATC 40, 1997)

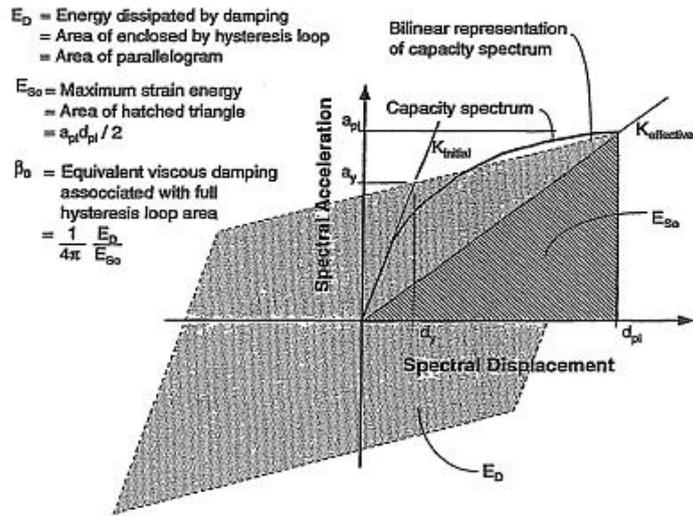
- Menentukan besarnya *viscous damping* efektif :

$$\beta_{eff} = K \cdot \beta_0 + 5 \tag{2.21a}$$

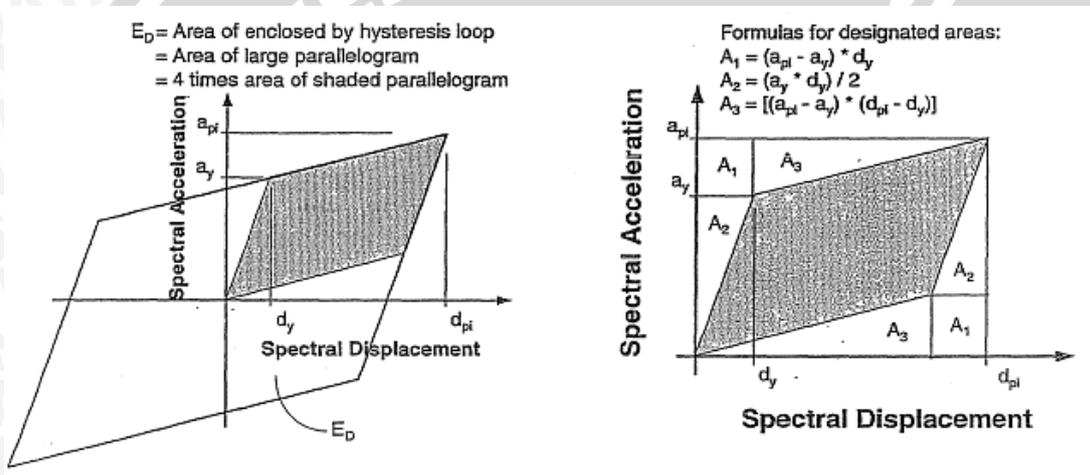
$$\beta_0 = \frac{E_D}{4\pi E_{SO}} \tag{2.21b}$$

Dengan E_D adalah energi yang dipancarkan oleh *damping* dan E_{SO} adalah energi regangan maximum (pada gambar 2.11 dan 2. 12)





Gambar 2. 11. Damping untuk reduksi spektral



Gambar 2.12. energi yang dipancarkan oleh damping

Pada gambar 2. 11 dan 2. 12 *hysteresis loop* – nya merupakan suatu pendekatan yang rasional untuk bangunan yang duktail penuh jika dikenai gempa periode pendek dan *viscous* ekuivalenya lebih kecil dari 30%. Untuk kondisi luar ini, *hysteresis loop* tersebut akan meng – *overestimate* besarnya *viscous damping* ekuivalen.

$$\begin{aligned}
 E_D &= 4 \times \text{daerah yang diarsir pada gambar 2. 10} & (2.22) \\
 &= 4 \times (a_{pi} \cdot d_{pi} - 2A_1 - 2A_2 - 2A_3) \\
 &= 4 \times (a_y \cdot d_{pi} - d_y \cdot a_{pi})
 \end{aligned}$$

$$E_{So} = \frac{a_{pi} d_{pi}}{2} \quad (2.23)$$

Angka 5 pada persamaan (2.21a) merupakan *viscous damping* pada struktur sebesar 5% yang dianggap konstan. Nilai K merupakan faktor modifikasi *viscous damping* ekuivalen

yang tergantung pada perilaku struktural bangunan. Untuk kesederhanaan ATC 40 menggolongkan tiga kategori perilaku struktural seperti tabel 2.1

Tabel 2.1 Nilai faktor modifikasi *viscous damping* ekuivalen, K

<i>Structural Behavior Type</i> ¹	β_{eff} (percent)	K
Type A ²	≤ 16.25	1.0
	> 16.25	$1.13 - \frac{0.51(a_{ydp_i} - d_{ya_{pi}})}{a_{pid_{pi}}}$
Type B	≤ 25	0.67
	> 25	$\frac{0.845 - 0.446(a_{ydp_i} - d_{ya_{pi}})}{a_{pid_{pi}}}$
Type C	Any value	0.33

Sumber : ATC 40, 1997

5. Menentukan besarnya reduksi spektrum respon relative :

$$S_{RA} = \left[\frac{3,21 - (0,68 \ln(\beta_{eff}))}{2,12} \right] \quad (2.24)$$

$$S_{RV} = \left[\frac{2,31 - (0,41 \ln(\beta_{eff}))}{1,65} \right] \quad (2.25)$$

Nilai S_{RA} dan S_{RV} tersebut harus lebih besar dari nilai pada tabel 2.2 , sedangkan tipe – tipe perilaku struktur dapat dilihat pada tabel 2.3, gambar 2.12 memperlihatkan reduksi pada respon spektrum yang dilakukan pada penulisan ini.

Tabel 2.2. nilai minimum S_{RA} dan S_{RV}

<i>Structural Behavior Type</i> ²	S_{RA}	S_{RV}
Type A ²	0.33	0.50
Type B	0.44	0.56
Type C	0.56	0.67

Sumber : ATC 40,1997

Tabel 2.3. tipe – tipe perilaku struktural

<i>Shaking Duration</i> ¹	<i>Essentially New Building</i> ²	<i>Average Existing Building</i> ³	<i>Poor Existing Building</i> ⁴
short	Type A	Type B	Type C
Long	Type B	Type C	Type C

Sumber : ATC 40

6. Menentukan besar masing – masing S_d dan S_a tereduksi dengan menggunakan persamaan:

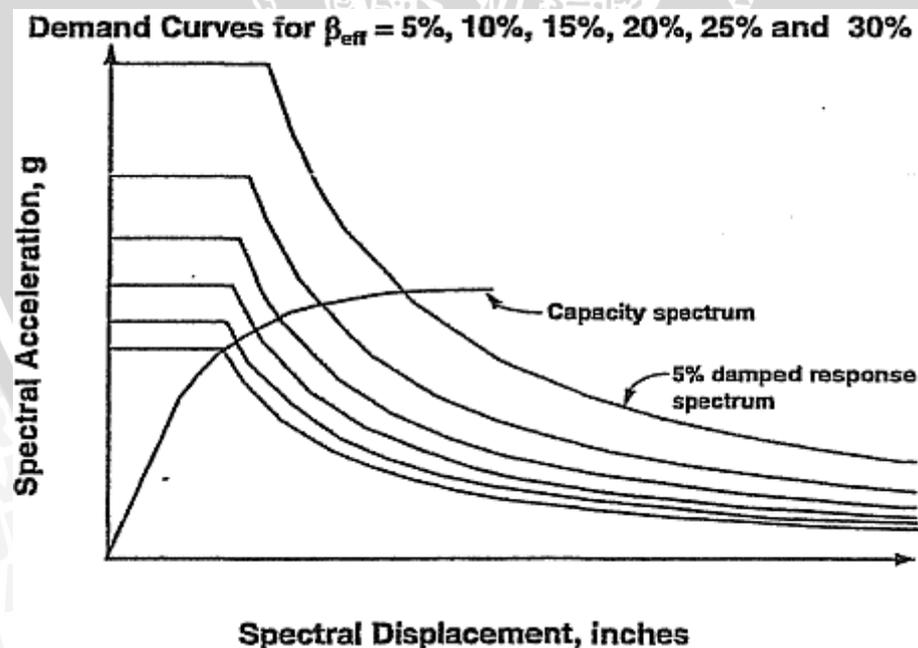
$$S_a = 2,5 \times S_{RA} \times C_A \quad (2.26)$$

$$T_s = \frac{S_{RV} \times C_V}{2,5 \times S_{RA} \times C_A} \quad (2.27)$$

$$S_{di} = \frac{T_i^2}{4\pi^2} \times S_a \times g \quad (2.28)$$

B. Langkah – langkah yang harus dilakukan pada **Prosedur B** adalah sebagai berikut :

1. Pembuatan respon spektrum dengan redaman 5% sesuai dengan keadaan tanah setempat.
2. Gambarkan respon spektrum dengan redaman 5% dan gambarkan juga respon spektrum dengan redaman efektif antara 5% hingga nilai redaman maksimum yang diijinkan untuk tiap – tiap tipe perilaku struktur bangunan seperti tabel 2. 4.



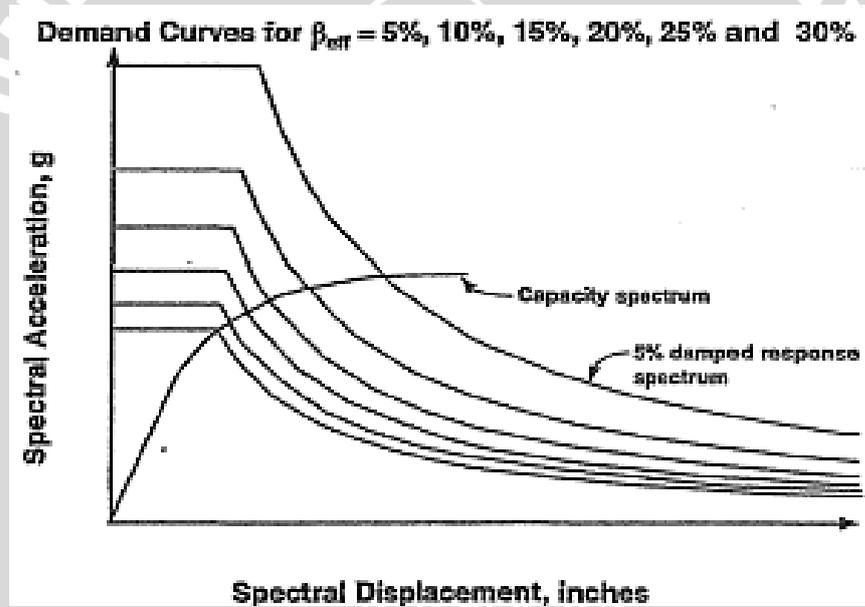
Gambar 2.13 kelompok respon spektrum

Tabel 2.4 faktor reduksi respon spektrum

β_0 (percent)	Behavior Type A ¹			Behavior Type B ²			Behavior Type C ³		
	β_{eff}	SR _A (1/B _d)	SR _V (1/B _U)	β_{eff}	SR _A (1/B _d)	SR _V (1/B _U)	β_{eff}	SR _A (1/B _d)	SR _V (1/B _U)
0	5	1.00	1.00	5	1.00	1.00	5	1.00	1.00
5	10	0.78	0.83	8	0.83	0.87	7	0.91	0.93
15	20	0.55	0.66	15	0.64	0.73	10	0.78	0.83
25	28	0.44	0.57	22	0.53	0.63	13	0.69	0.76
35	35	0.38	0.52	26	0.47	0.59	17	0.61	0.70
≥45	40	0.33	0.50 ²	29	0.44	0.56	20	0.56	0.67 ²

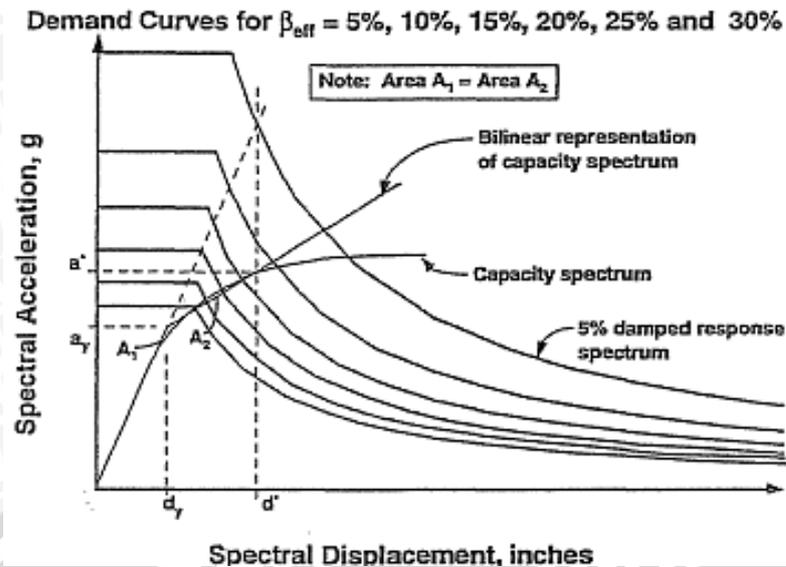
Sumber : ATC 40

- Plot kurva kapasitas dengan kelompok spektrum *demand* pada suatu grafik (gambar 2. 13). Kurva kapasitas harus diubah kedalam koordinat spektral menjadi kurva spektrum kapasitas dengan menggunakan persamaan 2.19a dan 2.10b



Gambar 2.14 kelompok respon spektrum dan spektrum kapasitas

- Buat hubungan bilinear pada spektrum kapasitas seperti gambar 2.15. initial slope dari kurva bilinear adalah sama dengan initial stiffness dari bangunan. Bagian dari kurva bilinear khususnya segmen leleh harus melalui spektrum kapasitas pada perpindahan sama dengan perpindahan spektral respon spektrum dengan redaman 5% pada kekakuan sebelum leleh (*pre – initial stiffness*), sehingga didapatkan titik (S^* , d^*). Kurva bilinear ini harus memperhatikan bahwa luasan daerah yang dibentuk yaitu A1 dan A2 harus sama.



Gambar 2.15. representasi bilinear

5. Hitung nilai perpindahan untuk tiap perpindahan di dekat titik (a^*, d^*) disesuaikan dengan nilai redaman efektif :

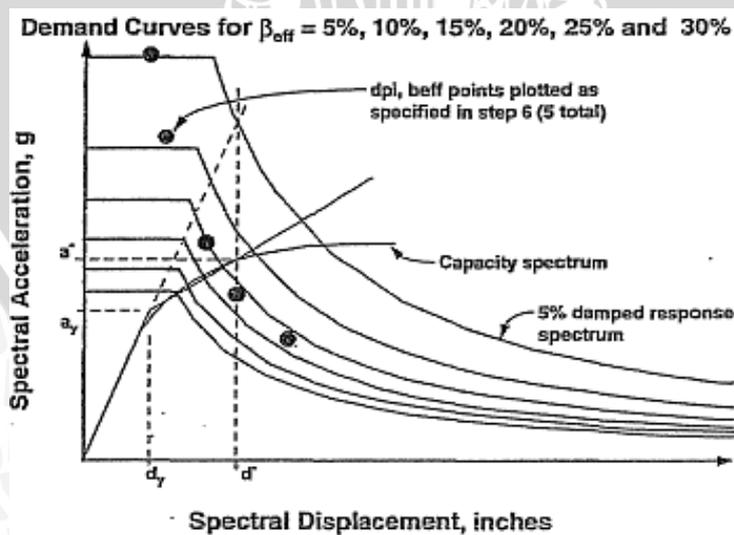
$$a_{pi} = \frac{(a^* - a_y)(d_{pi} - d_y)}{(d^* - d_y)} + a_y \tag{2.29}$$

$$\beta_{eff} = \frac{63,7 \cdot K(a_y \cdot d_{pi} - d_y \cdot a_{pi})}{(a_{pi} \cdot d_{pi})} + 5 \tag{2.30}$$

dengan nilai K didapatkan dalam tabel 2.2 dengan nilai β_0 :

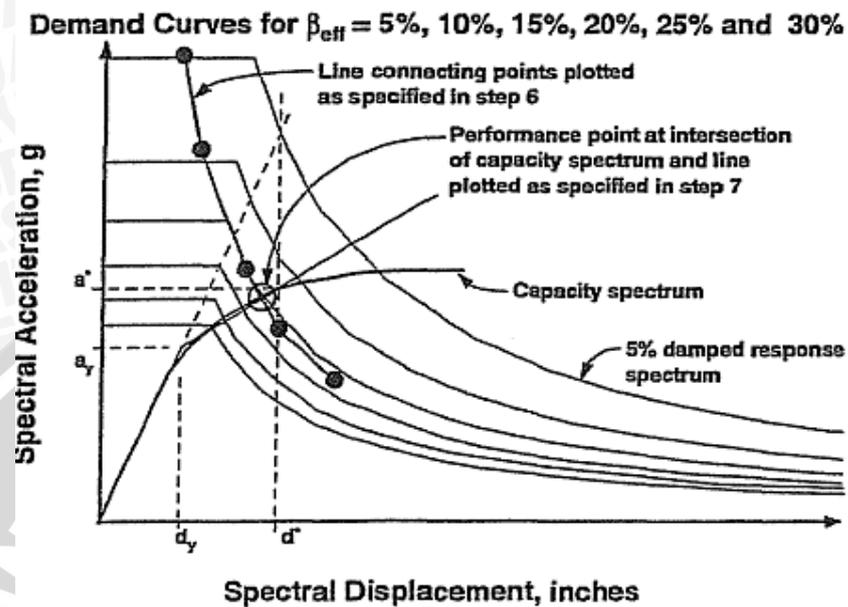
$$\beta_0 = \frac{63,7(a_y \cdot d_{pi} - d_y \cdot a_{pi})}{(a_{pi} \cdot d_{pi})} \tag{2.31}$$

6. Untuk setiap nilai d_{pi} yang didapatkan dari langkah 5 diplotkan bersama dengan kelompok spektrum demand yang sesuai.



Gambar 2.16 plot nilai d_{pi} dan β_{eff}

7. Hubungkan titik – titik yang didapatkan dari langkah 6 hingga membentuk sebuah garis seperti gambar 2.17. Perpotongan garis ini dengan spektrum kapasitas di definisikan sebagai *performance point*.



Gambar 2. 17 *Performance Point*

2. 4. 3 Prosedur menentukan titik kinerja (*Performance Point*)

2. 4. 3. 1 Prosedur A

Pada trial yang pertama didapatkan titik (d_{pi}, a_{pi}) yang merupakan perpotongan antara kurva kapasitas dan kurva respon spektrum tereduksi. Dengan melakukan pengamatan diratik garis bilinear hingga bertemu dengan garis *initial stiffness* ($K_{initial}$) yang didapatkan titik (d_{pi}, a_{pi}) .

Jika nilai tersebut pada range diantara $0,95d_{pi} \leq d_i \leq 1,05d_{pi}$ maka titik (d_{pi}, a_{pi}) adalah titik kinerja (*performance point*). Namun, jika d_i tidak berada dalam range tersebut maka prosedur A diulangi dari langkah 3 dengan titik trial (d_i, a_i) dan seterusnya sampai titik perpotongan memenuhi syarat range diatas.

2. 4. 3. 2 Prosedur B

Performance point didapatkan dari perpotongan antara kurva spektrum kapasitas dengan garis yang didapat dari titik – titik (d_{pi}, a_{pi}) dengan masing – masing nilai damping efektif (β_{eff}). Prosedur ini menghasilkan suatu nilai yang sama dengan prosedurnya lainnya, jika *performance point* didapatkan pada titik (a^*, d^*) . Apabila titik *performance point* yang didaapatkan jauh dari titi (a^*, d^*) , maka harus dibuktikan dengan menggunakan prosedur A atau prosedur C.

2. 5. Persyaratan Gempa Rencana Menurut SNI 1726 – 2012.

2. 5. 1 Parameter Percepatan Gempa

Menurut SNI 1726 – 2012 parameter S_s (percepatan batuan dasar pada perioda pendek) dan S_1 (percepatan batuan dasar pada perioda 1 detik) harus ditetapkan masing – masing dari respon spektral percepatan 0,2 detik dan 1 detik dalam peta gerak tanah seismik dengan kemungkinan 2% terlampaui dalam 50 tahun , dan dinyatakan dalam bilangan desimal terhadap percepatan gravitasi. Bila $S_1 \leq 0,04g$ dan $S_s \leq 0,15g$, maka struktur bangunan boleh dimasukkan ke dalam kategori desain sesimik A_1 dan cukup memenuhi persyaratan.

Berdasarkan sifat – sifat tanah pada situs, maka situs harus diklasifikasi sebagai kelas situs SA, SB, SC, SD, SE atau SF. Bila sifat – sifat tanah tidak teridentifikasi secara jelas sehingga tidak bisa ditentukan situsnya, maka kelas situs SE dapat digunakan.

Tabel 2.5 Klasifikasi situs

Kelas situs	\bar{v}_s (m/detik)	\bar{N} atau \bar{N}_{ch}	\bar{s}_u (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15sampai 50	50 sampai100

Sumber : SNI 1726 – 2012

Tabel 2.6 Koefisien situs, F_a

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa (MCE_R) terpetakan pada perioda pendek, $T=0,2$ detik, S_x				
	$S_x \leq 0,25$	$S_x = 0,5$	$S_x = 0,75$	$S_x = 1,0$	$S_x \geq 1,25$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
SE	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
SF	SS ^b				

Sumber : SNI 1726 – 2012

Tabel 2.7 Koefisien situs, F_v

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan pada periode 1 detik, S_1				
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 \geq 0,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
SD	2,4	2	1,8	1,6	1,5
SE	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
SF	SS ^b				

Sumber : SNI 1726 – 2012

Besaran – besaran v_s , N dan S_u dihitung menurut persamaan – persamaan berikut :

$$v_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}} \quad (2.32)$$

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}} \quad (2.33)$$

$$S_u = \frac{d_c}{\sum_{i=1}^k \frac{d_i}{s_{ui}}} \quad (2.34)$$

Dengan : d_i = tebal suatu lapisan tanah atau batuan di dalam lapisan 30 m paling atas

d_c = tebal total lapisan tanah kohesif di dalam lapisan 30 m paling atas

N = tahanan penetrasi standar

S_{ui} = kuat geser niralir suatu lapisan tanah kohesif i di dalam lapisan 30 m paling atas

S_u = kuat geser niralir

2. 5. 2 Beban Gempa Dasar Nominal

Analisis pushover yang diambil pada penulisan ini ialah analisis statik. Berdasarkan SNI 1726 – 2012 analisis statik dengan persamaan :

$$V = C_x W \quad (2.35)$$

$$F_x = 0,01 W_x \quad (2.36)$$

C_x = koefisien respon sesimik

F_x = gaya lateral rencana yang diaplikasikan pada lantai x

W_x = bagan beban mati total struktur yang bekerja pada lantai x