

## **BAB III**

### **LANDASAN TEORI**

#### **3.1 Perencanaan Struktur Tahan Gempa Berbasis Kinerja**

Saat merencanakan suatu bangunan pada daerah rawan gempa tentunya bangunan tersebut haruslah memiliki ketahanan terhadap gaya gempa. Konsep perencanaan bangunan tahan gempa berbasis kinerja atau yang dikenal dengan *Performance Based Earthquake Engineering* (PBEE) yang merupakan perpaduan antara aspek layan dan aspek tahanan. Konsep tersebut dapat diterapkan untuk merencanakan suatu struktur bangunan baru (*Performance Based Seismic Design*) ataupun melakukan evaluasi terhadap kinerja struktur bangunan yang sudah ada (*Performance Based Seismic Evaluation*), dengan mempertimbangkan kesiapan pakai (*occupancy*), risiko keselamatan (*life*), serta kerugian harta benda (*economic loss*) akibat gempa yang terjadi. Metodologi yang didasarkan pada desain seismik berbasis kinerja ialah kriteria desain dan evaluasi yang dinyatakan sebagai objektivitas kegunaan struktur.

Terdapat dua elemen utama pada *performance based seismic design* yaitu beban (*demand*) serta kapasitas struktur (*capacity*). Kapasitas struktur merupakan kemampuan yang dimiliki oleh struktur bangunan yang tujuannya untuk mengatasi gaya gempa dengan tidak mengalami kerusakan. Sedangkan, yang dimaksud dengan beban ialah representasi dari perilaku gerakan tanah yang diakibatkan oleh gempa bumi, yang mana penggambarannya berupa kurva respon spektrum.

Tujuan dari *performance based seismic design* yaitu merencanakan bangunan tahan gempa dimana kapasitas strukturalnya mampu diperhitungkan oleh perencana struktur. Sasaran kinerja dari *performance based seismic design* ialah bahaya gempa (*seismic hazard*) dan tingkat kinerja (*performance level*). Sesuai dengan filosofi desain yang ada bahwa tingkat kinerja struktur bangunan diakibatkan oleh gempa rencana. Keadaan suatu struktur bangunan mengalami tingkat kerusakan tertentu dan akan berakibat pada tingkat keselamatan penghuni dan juga kerusakan elemen struktur itu sendiri.

Salah satu alternatif analisis perencanaan struktur tahan gempa berbasis kinerja yang dapat dilakukan ialah analisis statik non-linear atau analisis *pushover*. Proses analisis struktur bangunan tersebut adalah dengan melakukan simulasi terhadap struktur dengan bermacam-macam kejadian gempa. Dengan proses tersebut dapat ditampilkan informasi terkait tingkat kerusakan struktur, kemampuan struktur untuk bertahan, keselamatan hidup, kesiapan pakai, dan kerugian harta benda. Kemudian dapat dilakukan perhitungan terkait anggaran biaya terkait dengan risiko kerusakan yang ditimbulkan.

### **3.2 Analisis Beban Dorong Statik Nonlinier (*Pushover*)**

Analisis beban dorong statik (*Pushover Analysis*) adalah metode analisis nonlinier statik, dimana dalam proses analisisnya pengaruh beban gempa rencana terhadap struktur bangunan gedung diasumsikan sebagai beban statik yang terdapat di pusat massa tiap-tiap lantai, yang besaran nilainya ditingkatkan secara berangsur-angsur sampai melampaui pembebanan yang mengakibatkan terjadinya pelelehan (sendi plastis) pada salah satu ataupun lebih di bagian struktur bangunan tersebut, selanjutnya dengan penambahan beban lebih lanjut akan terjadi perubahan bentuk *elastoplastis* hingga sampai pada kondisi hampir runtuh.

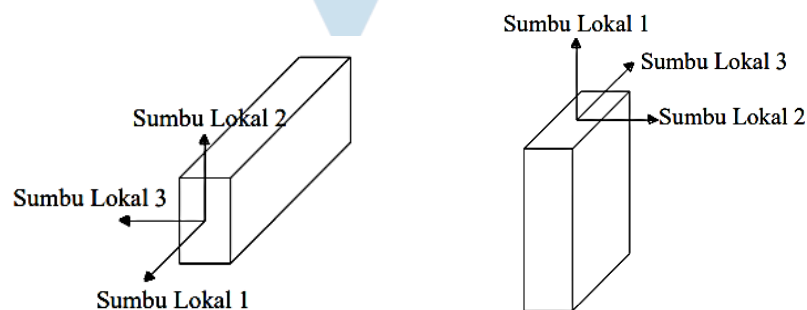
Proses analisis *pushover* akan memberikan informasi proses dalam identifikasi elemen-elemen struktur dari bangunan yang hendak mengalami keruntuhan paling dahulu. Saat dilakukan pembebanan secara bertahap, akan ada bagian-bagian lain yang mengalami deformasi *inelastic* dan mengalami leleh. Hasil yang didapatkan dari analisis *pushover* adalah nilai gaya geser dasar (*base shear*) untuk memperlihatkan perpindahan struktur (*displacement*). Nilai gaya geser tersebut akan dituangkan dalam bentuk kurva kapasitas (kurva *pushover*) yang merepresentasikan respon struktur berupa perpindahan lateral terhadap beban yang diberikan. Yang kemudian akan diidentifikasi elemen struktur mana saja yang terjadi kerusakan, kemudian dapat diambil tindakan preventif dengan melakukan kajian khusus terhadap elemen yang mengalami kerusakan.



Gambar 3.1 Kurva *Pushover*

Akan diperlihatkan pada kurva kapasitas suatu kondisi linier sebelum sampai pada kondisi leleh yang kemudian berperilaku nonlinier. Perilaku struktur berubah dari kondisi linier menjadi non-linier berupa penurunan kekakuan yang ditunjukkan dengan penurunan kemiringan kurva karena adanya sendi plastis pada kolom dan balok. Sendi plastis yang diakibatkan oleh momen lentur terjadi pada struktur apabila beban yang bekerja melampaui kapasitas momen lentur yang ditinjau. Tahapan utama pada proses analisa *pushover* ialah :

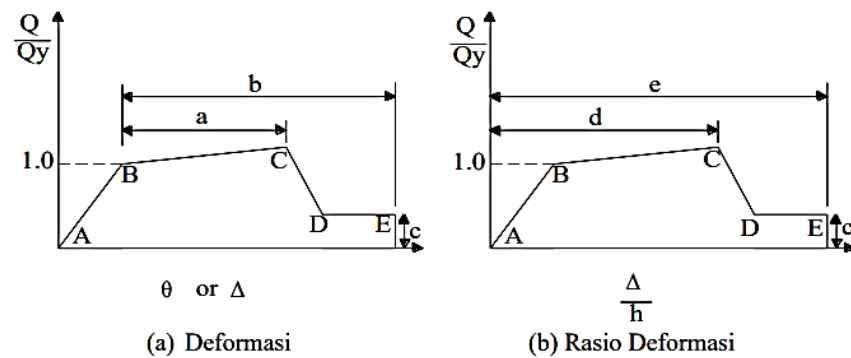
1. Melakukan permodelan perilaku leleh serta pasca leleh terhadap suatu elemen struktur pada *hinges properties*. Dimana struktur mengalami kondisi leleh pertama, dalam hal ini mutu beton, dimensi elemen struktur dan tulangan memengaruhi. *Hinges properties* untuk elemen balok serta kolom yaitu momen  $M_3$ , artinya bahwa terjadinya sendi plastis hanya diakibatkan oleh momen yang searah dengan sumbu lokal 3.



Gambar 3.2 Letak Sumbu Lokal pada Balok (kiri) dan Kolom (kanan)

Apabila tidak ada analisis perilaku klasifikasi sendi plastis atau data eksperimental untuk elemen balok serta kolom, maka grafik beban-

perpindahan umum seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 3.3 Grafik Beban-Perpindahan Umum

2. Dalam analisa *pushover* ini, peletakkan sendi plastis dinyatakan sebagai panjang relatif 0,05 dan 0,95. Dengan ini dapat diartikan bahwa sendi plastis terletak sedikit bergeser dari *joint* / pertemuan balok dan kolom pada *start joint*, *end joint* maupun keduanya.
3. Menetapkan titik kontrol yang bertujuan untuk mengamati nilai perpindahan struktur. Hasil koordinat nilai perpindahan gaya geser dasar serta titik kontrol digunakan untuk membuat kuva *pushover*.
4. Setelah dilakukan pemberian beban pada struktur maka analisis *pushover* dapat dilakukan. Dengan ini, target *displacement* tertentu dapat dicapai setelah struktur diberikan beban gravitasi serta beban statik lateral yang diberikan secara bertahap.
5. Menampilkan kurva *pushover* yang didasarkan pada pola distribusi gaya lateral, yang menggambarkan hubungan antara perpindahan dengan gaya geser dasar.
6. Estimasi nilai perpindahan lateral saat mencapai target perpindahan atau gempa rencana. Mendorong titik kontrol agar mencapai tingkat perpindahan tersebut, yang akan menggambarkan perpindahan maksimum karena intensitas gempa rencana yang telah ditargetkan.
7. Melakukan evaluasi terkait level kinerja struktur saat terjadi target perpindahan/gempa rencana. Respon perilaku dan komponen struktur akan dianggap memuaskan apabila mencapai kriteria yang telah ditetapkan dari awal, baik terhadap persyaratan kekuatan ataupun deformasi. Dalam hal ini

elemen struktur yang dievaluasi memiliki jumlah yang cukup banyak sehingga proses analisisnya harus dilakukan dengan bantuan program komputer (dalam hal ini penulis menggunakan program ETABS).

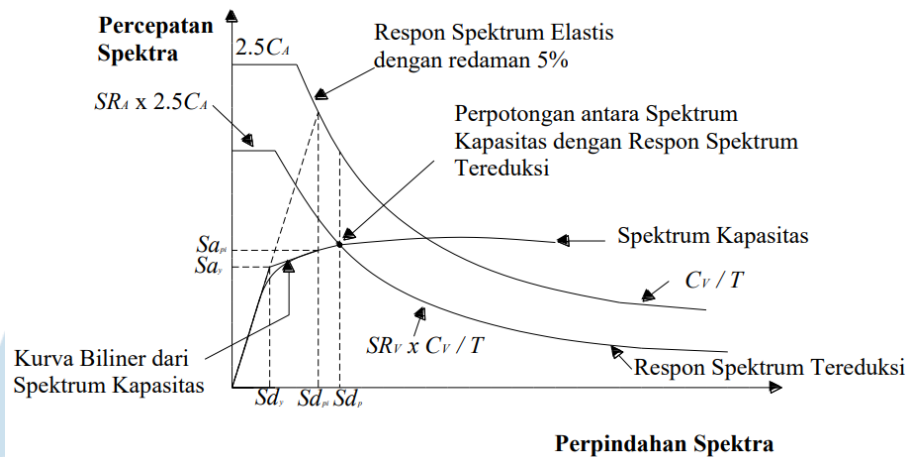
### **3.3 Metode Spektrum Kapasitas**

Dalam menentukan kinerja suatu struktur terdapat beberapa metode, salah satunya merupakan Metode Spektrum Kapasitas (ATC 40). Dalam analisis *pushover* akan menghasilkan *output* berupa kurva *pushover* disebut juga kurva kapasitas yang memperlihatkan hubungan gaya geser dasar (*base shear*) dengan simpangan atap (*roof displacement*). Kurva *pushover* tersebut kemudian diolah lebih lanjut dengan menggunakan properti dinamis sistem dan menghasilkan kurva kapasitas struktur dengan Metode Spektrum Kapasitas. Untuk respon spektrum diubah menjadi format ADRS (*Acceleration Displacement Respon Spectrum*). Format ADRS merupakan gabungan *acceleration* dengan *displacement* respon spektrum, dimana nilai absis ialah *acceleration* ( $S_a$ ) sedangkan nilai ordinatnya ialah periode ( $T$ ) dan *displacement* ( $S_d$ ) direpresentasikan sebagai garis miring dari pusat sumbu. Gerakan tanah akibat gaya gempa yang terjadi dikonversi pula kedalam format ADRS. Hal tersebut menjadikan kurva *pushover* dapat digambarkan pada sumbu yang sama sebagai gaya gempa perlu. Waktu getar dalam format ADRS ditunjukkan sebagai garis radial dari titik pusat sumbu.

$T_e$  merupakan waktu getar ekuivalen yang dianggap sebagai secant waktu getar disaat gerakan tanah akibat proses reduksi gaya gempa perlu yang disebabkan oleh efek redaman ekuivalen berpotongan pada kurva *pushover*. Karena redaman dan waktu getar ekuivalen adalah fungsi dari perpindahan maka solusi untuk mendapatkan nilai titik kinerja bersifat repetitif. Batas redaman ekuivalen sesuai dengan ATC-40 bertujuan untuk mengantisipasi adanya degradasi kekakuan dan kekuatan yang bertahap. Untuk respon spektrum dalam format ADRS, dimodifikasi dengan melakukan *input effective damping* yang terjadi karena adanya sendi plastis. Spektrum tersebut disebut dengan *demand spectrum*.

Pada Gambar 3.4. ditunjukkan bahwa Metode Spektrum Kapasitas akan menunjukkan tiga buah kurva secara grafis yaitu kurva spektrum kapasitas, kurva respon spektrum serta kurva *demand spectrum* dalam format ADRS. Perilaku

struktur bangunan dapat diketahui dengan meninjau intensitas gempa yang dimodelkan, dalam hal ini dilakukan perbandingan terhadap *demand* kinerja yang berupa respon spektrum berbagai periode gempa dan kurva *pushover*. Titik kinerja (*performance point*) diperoleh dari nilai koordinat titik potong antara kurva spektrum kapasitas dan kurva *demand spectrum*.



Gambar 3.4 Penentuan Titik Kinerja berdasarkan Metode Spektrum Kapasitas

Dalam Metode Spektrum Kapasitas kondisi bangunan dibagi menjadi tiga tipe dengan batasan-batasan sebagai berikut:

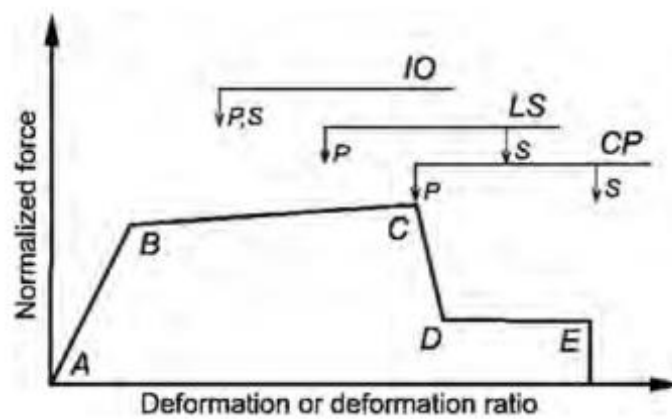
Tabel 3.1 Batasan Kondisi Bangunan berdasarkan ATC-40

<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>

### 3.4 Batas Kinerja Struktur Bangunan

*Performance Based Seismic Design* dapat merepresentasikan batas-batas kinerja dari tingkat kerusakan struktur bangunan akibat beban gempa rencana. Batasan tersebut dituangkan dalam bentuk kriteria kinerja (*performance level*) struktur. Batas kinerja struktur bangunan (*performance level*) merupakan derajat atau tingkat kerusakan dengan parameter kerusakan fisik struktur serta elemen struktur bangunan sehingga tidak membahayakan keselamatan pengguna struktur bangunan.

Melalui Gambar 3.5. dijelaskan bahwa respon linier diawali dari titik A (*unloaded component*) dan mulai terjadinya kelelahan di titik B. Respon yang terjadi dari titik B lalu ke titik C adalah respon elastis plastis. Puncak kekuatan komponen ditunjukkan pada titik C, dimana nilai absisnya yang merupakan deformasi menunjukkan permulaan terjadinya degradasi kekuatan struktur yang ditunjukkan dengan perbedaan tinggi antara titik C ke D. Titik D menunjukkan adanya respon elemen struktur yang secara substansial mengalami pengurangan kekuatan menuju ke titik E. Apabila deformasi yang terjadi bernilai lebih besar dari titik E, maka kekuatan elemen struktur menjadi nol (ASCE 41-17)



Gambar 3.5 Kurva Kriteria Keruntuhan (ASCE 41-17)

Pada titik B sampai C terdapat beberapa titik yang disebut sebagai level kinerja dari suatu struktur bangunan. Level kinerja suatu struktur bangunan menurut ASCE 41-17, dibedakan menjadi beberapa level seperti berikut:

1. *Immediate Occupancy Structural Performance Level (S-1)*

Level kinerja ini merupakan kondisi pascagempa. Dimana kerusakan yang terjadi masih sangat minim, sehingga kondisi bangunan dalam kategori aman dan resiko korban jiwa dapat diabaikan. Elemen nonstruktur masih berfungsi dengan baik dan berada pada tempatnya. Bangunan dapat digunakan sebagaimana fungsinya tanpa gangguan untuk perbaikan terhadap kerusakan struktur tersebut. Hal ini dapat terjadi karena pada dasarnya struktur mampu mempertahankan kekakuan serta kekuatan akibat terjadinya gaya gempa.

## 2. *Damage Control Structural Performance Level (S-2)*

Kondisi ini didefinisikan sebagai “*the continuous range*” dari level kinerja, dimana setelah terjadi gempa kerusakan yang dialami struktur berada diantara *Life Safety Structural Level (LS)* dan *Immediate Occupancy Structural Level (IO)*.

## 3. *Life Safety Structural Performance Level (S-3)*

*Life Safety* didefinisikan sebagai kondisi pascagempa dimana struktur mengalami kerusakan elemen struktur. Struktur mengalami penurunan kekakuan, namun masih sanggup untuk menahan keruntuhan. Bangunan masih dapat digunakan lagi dengan syarat perbaikan pada bagian struktur yang rusak telah dilakukan perbaikan.

## 4. *Limited Safety Structural Performance Level (S-4)*

Kondisi ini didefinisikan sebagai “*the continuous range*” dari level kinerja, dimana setelah terjadi gempa kerusakan yang dialami struktur berada diantara *Life Safety Structural Level (LS)* dan *Collapse Prevention Structural Performance Level (CP)*.

## 5. *Collapse Prevention Structural Performance Level (S-5)*

Pada level ini, kondisi bangunan pascagempa mengalami kerusakan yang cukup parah pada elemen struktur maupun nonstruktur. Keruntuhan yang terjadi hampir menyeluruh, hal ini diakibatkan oleh kekakuan dan kekuatan struktur mengalami degradasi cukup besar. Akibat kerusakan serta runtuhnya material, sangat memungkinkan adanya korban jiwa. Secara ekonomi bangunan mengalami kerugian yang cukup besar.

Hubungan antara level kinerja dan simpangan (*drift*) yang terdapat pada elemen vertikal sistem pemikul beban lateral yang merupakan struktur dengan rangka beton bertulang. Nilai simpangan yang terdapat di tabel berikut adalah nilai-nilai tipikal yang disajikan untuk memberikan informasi terhadap respon struktur secara keseluruhan yang sesuai dengan berbagai level kinerja struktur.

Simpangan total maksimum merupakan simpangan tiap tingkat yang terjadi pada perpindahan level kinerja struktur. Sedangkan, simpangan inelastis

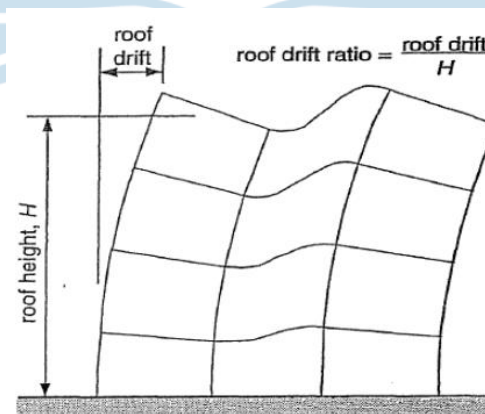


maksimum merupakan bagian dari simpangan total maksimum yang berada dibawah titik leleh. Pada tabel 3.2 memberikan informasi tentang batasan deformasi yang terjadi pada tiap level kinerja suatu struktur bangunan.

Tabel 3.2 Batasan *Drift* untuk Berbagai Level Kinerja Struktur  
(ATC-40)

Batas Simpangan Antar Tingkat	Level Kinerja Struktur			
	<i>Immediate Occupancy</i>	<i>Damage Control</i>	<i>Life Safety</i>	<i>Structural Stability</i>
Simpangan Total Maksimum	0,01	0,01-0,02	0,02	0,33 $V_i/P_i$
Simpangan Inelastis Maksimum	0,005	0,005-0,015	tidak dibatasi	tidak dibatasi

Secara kualitatif level kinerja struktur dapat dijelaskan dalam Gambar 3.5. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa simpangan pada struktur mengakibatkan perubahan pada struktur bangunan yang terjadi di atap. Rasio simpangan atap dapat dihitung dengan membandingkan nilai simpangan atap dan tinggi struktur bangunan.

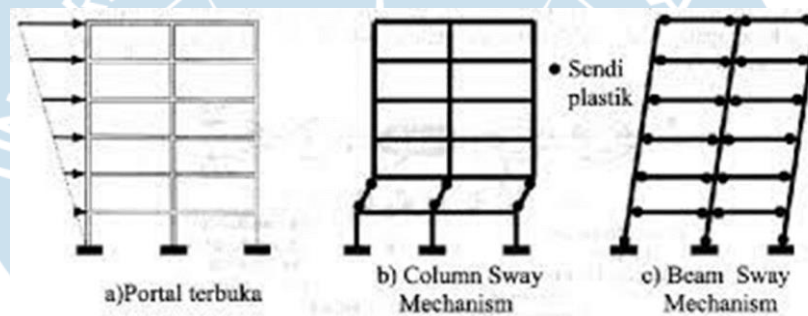


Gambar 3.6 Simpangan yang Terjadi di Atap dan Rasio Simpangan Atap  
(ATC-40)

### 3.5 Sendi Plastis

Suatu elemen struktur jika diberikan sebuah gaya ataupun beberapa gaya akan menimbulkan terjadinya tegangan. Apabila gaya-gaya tersebut dinaikkan

kapasitasnya, maka menyebabkan tegangan yang terjadi juga akan mengalami peningkatan. Pada titik tertentu, gaya-gaya yang hendak diberikan sudah mencapai batas maksimal atau dengan kata lain tidak bisa ditingkatkan lagi. Hal tersebut dapat terjadi apabila seluruh tampang elemen struktur yang dikenai gaya telah mencapai tegangan lelehnya. Pada kondisi tersebut, elemen struktur mengalami defleksi pada gaya yang tetap/konstan. "Daerah dimana suatu tampang elemen struktur sudah tidak mampu menanggung penambahan gaya yang semakin besar diartikan sebagai sendi plastis (*plastic hinges*). (Satyarno, 2012)" Sendi plastis dapat dialami oleh struktur portal yang memiliki banyak derajat kebebasan atau MDOF (*Multi Degree of Freedom*)



Gambar 3.7 Skema Sendi Plastis yang Terjadi pada Elemen Struktur

Apabila suatu bangunan gedung mengalami gaya gempa yang cukup besar, maka akan terjadi momen-momen pada kolom atau baloknya. Ketika besarnya momen-momen tersebut memiliki nilai yang jauh lebih besar dan melampaui besarnya momen kapasitas kolom atau balok portal, maka akan mengakibatkan sendi plastis pada elemen struktur tersebut yang ditandai dengan proses lelehnya tulangan baja. "Sendi plastis membutuhkan proses bertahap untuk sampai pada titik runtuhnya suatu bangunan gedung. (Jamal, 2011)"