

## **BAB III**

### **LANDASAN TEORI**

#### **3.1 Kerusakan Struktur Bangunan**

Pada umumnya bangunan didesain akan mampu tetap berfungsi dengan baik selama umur rencana pakai bangunan. Namun dalam kenyataannya di lapangan, sebelum mencapai akhir umur pakai, bangunan sudah mengalami kerusakan baik akibat faktor umur maupun faktor kerusakan akibat bencana yang sebelumnya jenis kerusakan itu tidak terduga saat perencanaan. Kerusakan itu akan lebih baik jika diketahui lebih awal untuk menghindari dampak kerusakan lainnya. Menurut peraturan Menteri Pekerjaan Umum No 24 tahun 2008 intensitas kerusakan bangunan digolongkan atas tiga tingkat kerusakan, yaitu:

1. Kerusakan ringan
  - a. Kerusakan yang terjadi pada komponen non-struktural seperti penutup lantai, dinding pengisi, langit-langit, dan penutup atap.
  - b. Biaya maksimum untuk perawatan pada kerusakan ringan yaitu 35% dari harga satuan tertinggi pembangunan bangunan gedung baru yang berlaku, untuk tipe dan lokasi yang sama.
2. Kerusakan sedang
  - a. Kerusakan pada sebagian komponen struktural, dan atau komponen non-struktural seperti lantai, penutup atap, dan lain-lain.
  - b. Biaya maksimum sebesar 45% untuk perawatan dari harga satuan tertinggi pembangunan gedung baru yang berlaku, untuk lokasi dan tipe yang sama.
3. Kerusakan berat
  - a. Kerusakan yang terjadi pada sebagian komponen struktural dan non-struktural dan jika diperbaiki masih dapat berfungsi dengan baik.
  - b. Untuk perawatan, biayanya sebesar 65% dari harga satuan tertinggi pembangunan bangunan gedung baru yang berlaku, untuk lokasi dan tipe yang sama.

Selain itu, menurut Triwiyono (2005) ada beberapa faktor yang menyebabkan kerusakan bangunan selama masa pakai. Faktor-faktor tersebut dideskripsikan sebagai berikut.

1. masalah *durability* akibat material yang kurang baik,
2. lingkungan agresif yang belum diantisipasi saat perencanaan,
3. kesalahan perencanaan dan pelaksanaan,
4. *overloading* akibat kenaikan beban karena perubahan fungsi/pemakaian bangunan,
5. kenaikan *life span*, yaitu adanya peningkatan lamanya waktu fungsi bangunan dari rencana awal,
6. penyebab khusus dan beban berlebih: kebakaran, gempa, banjir, dan
7. *life span* yang berbeda-beda antara beban bahan struktur dan non struktur.

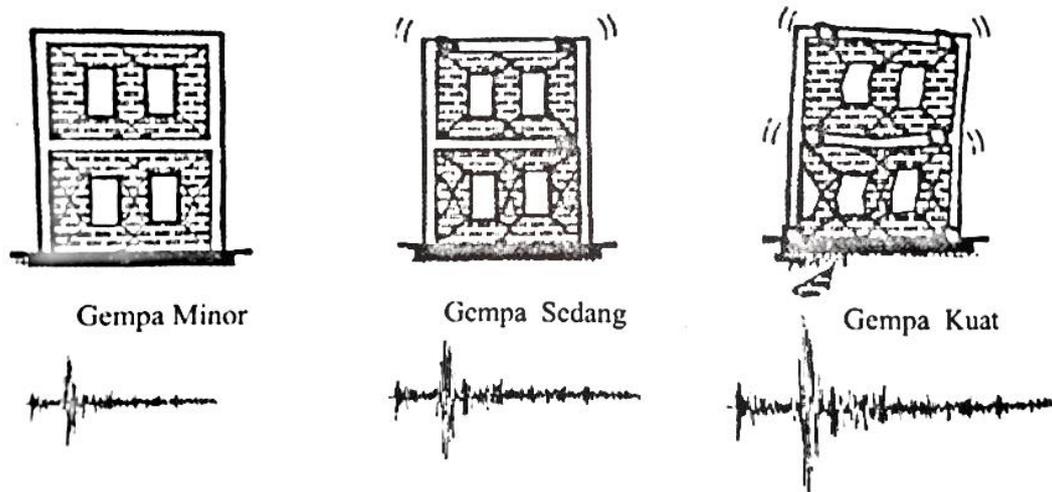
Pada penelitian ini objek penelitian berada di wilayah Yogyakarta, yang terletak di wilayah rawan bencana gempa, sehingga faktor kerusakan bangunan lebih ditekankan akibat gaya gempa bumi (*seismic force*).

### **3.2 Filosofi Bangunan Tahan Gempa**

Bangunan tahan gempa adalah bangunan yang mampu bertahan dan tidak runtuh jika terjadi gempa. Bangunan tahan gempa bukan berarti tidak boleh mengalami kerusakan sama sekali namun bangunan tahan gempa boleh mengalami kerusakan asalkan masih memenuhi persyaratan yang berlaku. Menurut Widodo (2012) filosofi bangunan tahan gempa adalah sebagai berikut ini.

1. Pada gempa kecil (*light*, atau *minor earthquake*) yang sering terjadi, maka struktur utama bangunan harus berfungsi dengan baik dan tidak rusak. Kerusakan kecil pada elemen non struktur masih dapat ditoleransi dan dibolehkan.
2. Pada gempa menengah (*moderate earthquake*) yang relatif jarang terjadi, maka struktur utama bangunan masih harus dapat diperbaiki dan boleh rusak/retak ringan. Elemen non struktur boleh rusak tetapi masih dapat diganti yang baru.
3. Pada gempa kuat (*strong earthquake*), maka bangunan boleh rusak tetapi tidak boleh runtuh total (*totally collapse*). Kondisi seperti ini jarang terjadi dan diharapkan pada gempa besar (*great earthquake*) bisa melindungi manusia/penghuni bangunan secara maksimum.

Level-level kerusakan bangunan tersebut dapat diilustrasikan pada Gambar 3.1 di bawah ini.



**Gambar 3. 1 Level-level kerusakan bangunan**

(Sumber: Widodo, 2012)

### 3.3 *Performance Levels*

Di dalam FEMA 273 dan FEMA 356 dijelaskan level-level kinerja bangunan berdasarkan pada level kerusakan dan status operasionalnya. Berikut adalah *performance levels* yang diurutkan dari respons yang paling kecil (ATC 58-2).

#### 1. *Operational Level (O)*

Secara umum mengalami kerusakan sangat ringan pada bangunan. Elemen non-struktur rusak kecil dan elemen struktur bisa berfungsi dengan baik sebagaimana mestinya. Semua komponen pendukung bangunan masih berfungsi dengan baik seperti *power plant*, *piping*, *electrical*, dan lain-lain. Kondisi bangunan masih dapat beroperasi setelah terjadi gempa.

#### 2. *Immediate Occupancy (IO)*

Kerusakan ringan terjadi pada bangunan. Kekuatan elemen struktur sama seperti sebelum terjadi gempa dan kerusakan kecil terjadi pada elemen non struktur, seperti *lift* dapat dihidupkan kembali. Komponen pendukung bisa berfungsi setelah diperbaiki oleh teknisi. Secara umum bangunan hanya mengalami kerusakan ringan dan masih dapat ditinggali untuk sementara.

#### 3. *Life Safety (LS)*

Bangunan mengalami kerusakan sedang. Bangunan masih dapat berdiri, namun beberapa elemen struktur rusak dan kehilangan kekuatan serta kekakuan. Sistem mekanikal dan elektrikal rusak berat serta elemen non struktur lainnya banyak yang rusak dan berjatuh, tapi penghuni didalamnya masih dapat selamat dan keluar menyelamatkan diri saat gempa terjadi. Sebaiknya bangunan ditinggali karena tidak aman.

#### 4. *Collapse Prevention (CP)*

Bangunan masih dapat berdiri dan tidak runtuh walaupun mengalami kerusakan berat. Bangunan harus dirobohkan dan tidak dapat dipakai lagi karena elemen non struktur sudah rusak walaupun elemen struktur seperti kolom masih dapat memberi kekuatan setelah gempa terjadi.

### **3.4 Dimensi Elemen Struktur**

#### **3.4.1 Penentuan Dimensi Elemen Struktur**

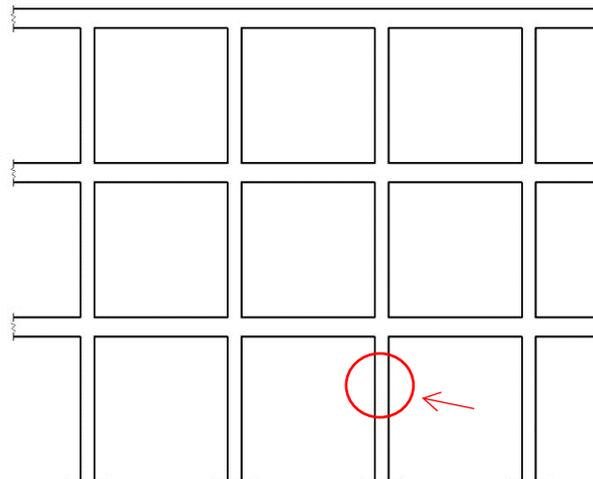
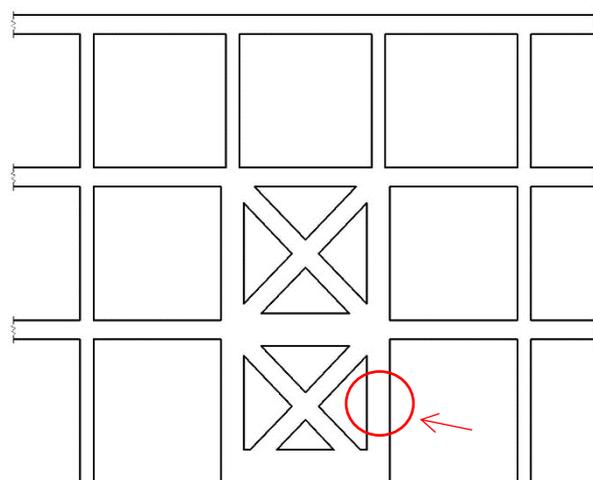
Pada penelitian ini tidak menghitung perencanaan elemen struktur kolom, balok, pelat, *x-bracing* dan tangga. Dimensi elemen struktur tersebut didapatkan dengan cara melihat gambar pada *shop drawing* gedung yang telah didapat pada saat pengumpulan data dan pengukuran langsung di lapangan untuk data yang belum ada. Data *shop drawing* merupakan satu-satunya data yang didapat pada saat pengumpulan data dan untuk data *as built drawing*-nya tidak didapatkan dengan alasan tidak tersedianya data tersebut. Pada gambar *shop drawing* masih ada kekurangan data seperti belum adanya data dimensi struktur kolom, balok, pelat, *x-bracing* dan tangga, sehingga diperlukannya pengambilan data langsung dengan cara mengukur langsung di lapangan dengan bantuan alat. Alat yang digunakan dalam pengambilan data adalah Leica DISTO A3 yaitu sebuah alat pengukur jarak dengan laser yang bisa dilihat pada Gambar 3.2. Cara menggunakannya yaitu dengan menembakkan laser ke arah batas yang ingin diukur dan alat dengan otomatis menampilkan jarak tersebut di layar *display*.



**Gambar 3. 2 Leica DISTO A3**

### **3.4.2 Pembesaran Dimensi Kolom pada Struktur *X-bracing***

Gedung Fakultas Hukum UII pada kondisi pasca perbaikan dan perkuatan telah dilakukan renovasi dengan penambahan struktur *x-bracing*. Metode yang digunakan yaitu *concrete jacketing* yang menyebabkan terjadinya pembesaran dimensi di struktur kolom pada bagian struktur *x-bracing*, sehingga di struktur kolom pada bagian struktur *x-bracing*, dimensinya lebih besar seperti yang terlihat pada Gambar 3.3 (b) dari pada dimensi struktur kolom yang tidak ada struktur *x-bracing* seperti yang terlihat pada Gambar 3.3 (a).

(a) Dimensi kolom tanpa *x-bracing*(b) Dimensi kolom dengan *x-bracing***Gambar 3. 3 Pembesaran dimensi kolom pada struktur x-bracing**

### 3.5 Teknik Perbaikan dan Perkuatan Struktur Bangunan

Dalam penelitian ini diketahui bahwa perbaikan dan perkuatan struktur yang telah dilakukan pada bangunan adalah dengan adanya penambahan struktur *x-bracing* dan terjadinya pembesaran dimensi pada struktur kolom di struktur *x-bracing* sebagai akibat adanya penambahan struktur *x-bracing* itu sendiri. Pembahasan dibatasi hanya pada metode yang dipakai yaitu metode *bracing* dan *concrete jacketing*. Selain metode tersebut masih ada metode lainnya seperti *patching*, *grouting*, *shotcrete* (beton tembak), *grout preplace aggregate* (beton prepack), *self compacting concrete*, *fibre reinforced polymer* (FRP), dan sebagainya.

Tipe bangunan yang berbeda akan memiliki karakteristik respon seismik bangunan dan potensi defisiensi seismik yang berbeda pula sehingga metode perbaikan seismik yang akan digunakan belum tentu sama untuk tiap tipe bangunan. Pengkategorian defisiensi-defisiensi seismik perlu dilakukan untuk memudahkan penentuan metode perbaikan seismik. Menurut FEMA 547 (2006), defisiensi seismik dikategorikan sebagai berikut:

1. kekuatan global,
2. kekakuan global,
3. konfigurasi bangunan,
4. *load path*,
5. diafragma,
6. pendetailan komponen bangunan,
7. fondasi, dan
8. defisiensi lainnya, seperti bencana geologi, bangunan yang berdekatan, dan deteriorasi material struktur.

Teknik perbaikan seismik yang umumnya digunakan adalah antara lain penambahan elemen baru berupa elemen-elemen penahan beban lateral, peningkatan elemen pasca perbaikan dan perkuatan dari segi kekuatan dan kekakuan, penambahan sambungan antar elemen, pengurangan *demand*, dan penghilangan beberapa komponen bangunan yang menyebabkan defisiensi. Peningkatan elemen pasca perbaikan dan perkuatan berupa metode *jacketing* dan penambahan elemen baru berupa *bracing* adalah metode yang cukup populer karena keefektifitasnya dan relatif mudah dalam pengaplikasian di lapangan.

### **3.5.1 Perkuatan dengan *Concrete Jacketing***

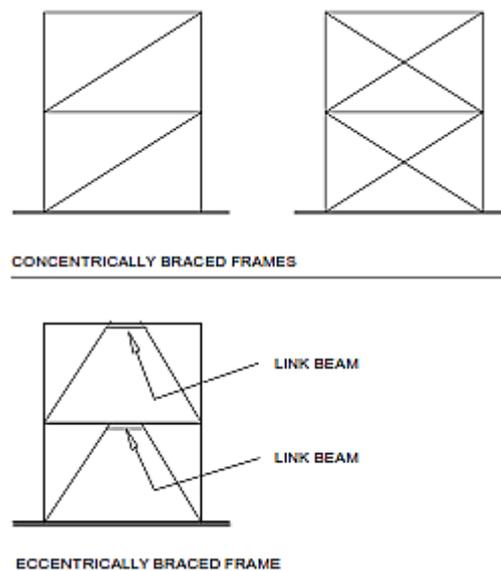
Rosyidah dkk. (2010) menjelaskan, *jacketing* adalah teknik perkuatan dengan cara melapisi seluruh atau sebagian permukaan elemen struktur dengan beton baru dengan atau tanpa disertai dengan penambahan tulangan longitudinal maupun tulangan transversal. Beton baru yang ditambahkan harus memiliki kuat tekan yang lebih tinggi atau minimal sama dengan beton struktur yang diperkuat untuk memaksimalkan penambahan kemampuan tekan struktur.

Melalui penambahan dimensi serta tulangan ini diharapkan untuk menambah kapasitas kekuatan struktur. Pekerjaan *concrete jacketing* dapat dilakukan dengan tahap sebagai berikut.

1. menghilangkan semua bagian-bagian beton yang telah lapuk (terkontaminasi) atau menghilangkan semua bagian beton yang retak-retak berat pada pekerjaan perbaikan beton yang telah rusak,
2. untuk kondisi beton yang belum rusak cukup dilakukan pengupasan beton sampai terlihat tulangan longitudinal,
3. melapisi beton lama dengan bahan perekat,
4. cor beton perlapis, bila bidang yang dilapisi sangat luas dapat juga dipakai secara *shotcrete*. Untuk ketebalan lebih dari 5 cm perlu diperkuat dengan kawat anyaman agar tidak terjadi retak-retak sebagai akibat adanya susut pada beton. Untuk peletakan sengkang dipasang melalui 2 tahap yaitu dengan sengkang U dan sengkang lurus, dan
5. dalam melaksanakan metode *concrete jacketing* diperlukan ketelitian dikarenakan dalam memasang sengkang harus diperhatikan jarak antara tulangan longitudinal.

### **3.5.2 Perkuatan dengan RC (*Reinforced Concrete*) Bracing**

*Bracing* merupakan salah satu sistem penahan beban lateral yang efektif. Pertambahan elemen struktur *bracing* pada struktur pasca perbaikan dan perkuatan dapat meningkatkan tahanan terhadap beban lateral dengan mentransfer beban lateral akibat gempa menjadi beban aksial yang ditahan oleh batang diagonal pada *bracing*. Sistem *bracing* menambah kinerja struktur rangka dengan meningkatkan kekakuan dan kapasitasnya dalam menahan beban lateral (Viswanath, 2010). Sistem *bracing* dibagi menjadi dua menurut FEMA 310, yaitu *bracing* konsentrik dan *bracing* eksentrik, dengan penjelasan pada Gambar 3.4 di bawah ini.



**Gambar 3. 4 Sistem *bracing* konsentrik dan eksentrik**

(Sumber: FEMA 310, 1998)

Sistem *bracing* eksentris memiliki *bracing* yang penempatannya jauh dari *joint* balok dan kolom. Sedangkan sistem *bracing* konsentrik memiliki *bracing* yang terhubung pada *joint* balok dan kolom atau pada hubungan konsentris dengan batang *bracing* yang lain. Eksentrisitas minor pada sambungan mungkin ada sehingga harus diperhitungkan dalam perencanaan. Eksentrisitas bertujuan agar terjadi konsentrasi perilaku inelastik pada suatu titik yang ditentukan yang akan berpengaruh terhadap perilaku sistem struktur secara keseluruhan.

Sistem *bracing* eksentrik memiliki suatu bagian yang disebut *link beam* yang direncanakan untuk mengalami deformasi inelastik yang cukup besar saat memikul gaya-gaya akibat kombinasi beban gempa rencana. Namun perbaikan menggunakan *bracing* eksentrik akan membutuhkan pendetailan dan teknik pelaksanaan yang lebih rumit dibandingkan *bracing* konsentrik. Biaya yang dibutuhkan pun akan lebih besar jika menggunakan *bracing* eksentrik sehingga *bracing* konsentrik lebih umum digunakan. Pada penelitian ini, gedung yang dievaluasi terdapat *RC (reinforced concrete) bracing* yang menjadi elemen perkuatan pasca gedung dilanda gempa (renovasi). *RC bracing* yang diterapkan yaitu sistem *bracing* konsentrik dengan bentuk diagonal X atau *x-bracing*.

### 3.6 Pembebanan

Pembebanan yaitu beban-beban yang digunakan dalam menganalisis yang terdiri dari 3 beban yaitu.

#### 3.6.1 Beban Mati

Beban mati adalah beban dari elemen gedung yang bersifat permanen termasuk peralatan tetap yang menjadi bagian tak terpisahkan dari gedung. Besarnya beban mati pada gedung dapat dilihat pada Tabel 3.1.

**Tabel 3. 1 Beban mati pada gedung**

No	Jenis beban mati	Berat	Satuan
1	Baja	7,85	t/m <sup>3</sup>
2	Beton	2,2	t/m <sup>3</sup>
3	Pasangan batu kali	2,2	t/m <sup>3</sup>
4	Mortar, spesi	2,2	t/m <sup>3</sup>
5	Beton bertulang	2,4	t/m <sup>3</sup>
6	Pasir	1,6	t/m <sup>3</sup>
7	Dinding pasangan bata 1/2 batu	0,25	t/m <sup>2</sup>
8	Langit-langit dan penggantung	0,02	t/m <sup>2</sup>
9	Finishing lantai (tegel atau keramik)	2,2	t/m <sup>3</sup>
10	Instalasi plumbing (ME)	0,025	t/m <sup>2</sup>
11	Penutup atap genteng	0,05	t/m <sup>2</sup>

(Sumber: Pedoman perencanaan pembebanan untuk rumah dan gedung 1987 Hal 5)

#### 3.6.2 Beban Hidup

Beban hidup adalah beban yang terjadi akibat penghunian atau penggunaan suatu gedung dan di dalamnya termasuk beban-beban pada lantai yang berasal dari benda-benda yang berpindah, sehingga mengakibatkan perubahan dalam pembebanan lantai dan atap tersebut. Besarnya beban hidup lantai bangunan dapat dilihat pada Tabel 3.2.

**Tabel 3. 2 Beban hidup pada gedung**

No	Jenis beban hidup	Berat	Satuan
1	Dak atap bangunan	0,1	t/m <sup>2</sup>
2	Rumah tinggal	0,2	t/m <sup>2</sup>
3	Kantor, sekolah, hotel, pasar, rumah sakit	0,25	t/m <sup>2</sup>
4	Hall, tangga, corridor, balcony	0,3	t/m <sup>2</sup>

(Sumber: pedoman perencanaan pembebanan untuk rumah dan gedung 1987 Hal 12)

### 3.6.3 Beban Gempa

Adanya beban gempa terjadi akibat dari adanya fenomena alam yang disebut gempa bumi. Gempa bumi terjadi akibat adanya benturan atau gesekan kerak bumi yang mempengaruhi permukaan bumi. Kejadian ini menyebabkan permukaan bumi dan bangunan di atasnya bergetar akibat adanya gelombang yang menjalar ke permukaan. Pada saat bangunan bergetar, muncul gaya-gaya pada struktur bangunan karena adanya kecenderungan dari massa bangunan untuk mempertahankan dirinya dari gerakan yang terjadi. Gaya yang muncul disebut gaya inersia, besar gaya tersebut tergantung pada beberapa faktor, yaitu:

1. massa bangunan.
2. pendistribusian massa bangunan.
3. kekakuan struktur.
4. jenis tanah.
5. mekanisme redaman dari struktur.
6. perilaku dan besar alami getaran itu sendiri.
7. wilayah kegempaan.
8. periode getar alami.

## 3.7 Analisis Perencanaan Terhadap Gempa (SNI 1726 2012)

### 3.7.1 Gempa Rencana

Gempa rencana ditetapkan sebagai gempa dengan kemungkinan terlewat sebesar 2 persen selama umur struktur bangunan 50 tahun adalah sebesar 2 persen.

### 3.7.2 Kategori Risiko Bangunan

Kategori risiko bangunan yaitu tingkat risiko yang diperbolehkan pada bangunan yang direncanakan sesuai peruntukannya. Penentuannya dapat dilihat pada Tabel 3.3.

**Tabel 3. 3 Kategori risiko bangunan gedung dan non gedung untuk beban gempa**

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
<p>Gedung dan non gedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fasilitas pertanian, perkebunan, perternakan, dan perikanan.</li> <li>- Fasilitas sementara</li> <li>- Gudang penyimpanan</li> <li>- Rumah jaga dan struktur kecil lainnya.</li> </ul>	I
<p>Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I, III, IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Perumahan</li> <li>- Rumah toko dan rumah kantor</li> <li>- Pasar</li> <li>- Gedung perkantoran</li> <li>- Gedung apartemen/rumah susun</li> <li>- Pusat perbelanjaan/mall</li> <li>- Bangunan industri</li> <li>- Fasilitas manufaktur</li> <li>- Pabrik</li> </ul>	II
<p>Gedung dan non gedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bioskop</li> <li>- Gedung pertemuan</li> <li>- Stadion</li> <li>- Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat</li> <li>- Fasilitas penitipan anak</li> <li>- Penjara</li> <li>- Bangunan untuk orang jompo</li> </ul> <p>Gedung dan non gedung, tidak termasuk kedalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan atau gangguan massal terhadap kehidupan masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pusat pembangkit listrik biasa</li> </ul>	III

Lanjutan Tabel 3. 3 Kategori risiko bangunan gedung dan non gedung untuk beban gempa

Jenis pemanfaatan	Kategori risiko
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fasilitas penanganan air</li> <li>- Fasilitas penanganan limbah</li> <li>- Pusat telekomunikasi</li> </ul> <p>Gedung dan non gedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak di mana jumlah kandungan bahayanya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.</p>	
<p>Gedung dan non gedung yang ditujukan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bangunan-bangunan monumental</li> <li>- Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan</li> <li>- Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat</li> <li>- Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, angin badai, dan tempat perlindungan lainnya</li> <li>- Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat</li> <li>- Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat</li> <li>- Pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat</li> <li>- Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangki air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat.</li> </ul> <p>Gedung dan non gedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.</p>	IV

(Sumber: SNI 1726 2012 Hal 14)

### 3.7.3 Faktor Keutamaan Gempa ( $I_e$ )

Nilai  $I_e$  ditentukan berdasarkan kategori risiko bangunan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.4.

**Tabel 3. 4 Faktor keutamaan gempa**

Kategori Risiko	Faktor Keutamaan Gempa, $I_e$
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,50

(Sumber: SNI 1726 2012 Hal 15)

**3.7.4 Klasifikasi Situs**

Dalam perumusan kriteria desain seismik suatu bangunan di permukaan tanah, maka permukaan tanah untuk suatu situs tersebut harus diklasifikasikan terlebih dahulu. Klasifikasi situs tersebut ditentukan berdasarkan Tabel 3.5.

**Tabel 3. 5 Klasifikasi situs**

Kelas situs	$V_s$ (m/detik)	$N$ atau $N_{ch}$	$S_u$ (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)	350 sampai 750	>50	$\geq 100$
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50
	atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Indeks plastisitas, <math>PI &gt; 20</math></li> <li>2. Kadar air. <math>w \geq 40\%</math></li> <li>3. Kuat geser niralir <math>S_u &lt; 25</math> kPa</li> </ol>		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situ yang mengikuti 6.10.1)	setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah</li> <li>- Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan <math>H &gt; 3</math> m)</li> </ul>		

Lanjutan Tabel 3.5 Klasifikasi situs

Kelas situs	$V_s$ (m/detik)	$N$ atau $N_{ch}$	$S_u$ (kPa)
	- Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan indeks plastisitas $PI > 75$ ) Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $S_u < 50$ kPa		

(Sumber: SNI 1726 2012 Hal 17)

### 3.7.5 Parameter Percepatan Gempa

Parameter spektrum respons percepatan pada periode pendek ( $S_{MS}$ ) dan periode 1 detik ( $S_{M1}$ ) yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs, ditentukan dengan perumusan berikut ini.

$$S_{MS} = F_a \cdot S_s \quad (3-1)$$

$$S_{M1} = F_v \cdot S_I \quad (3-2)$$

Keterangan:

$S_s$  = Parameter respons spectra percepatan gempa MCER terpetakan untuk periode pendek

$S_I$  = Parameter respons spectra percepatan gempa MCER terpetakan untuk periode 1 detik

Koefisien situs pada getaran periode pendek ( $F_a$ ) dan getaran periode 1 detik ( $F_v$ ) ditentukan mengikuti Tabel 3.6 dan Tabel 3.7.

**Tabel 3. 6 Faktor amplifikasi percepatan pada getaran periode pendek ( $F_a$ )**

Kelas Situs	Parameter respons spectral percepatan gempa (MCE <sub>R</sub> ) terpetakan pada perioda pendek, $T = 0,2$ detik, $S_s$				
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s \geq 1,25$
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 Hal 22)

Catatan:

- a. Untuk nilai-nilai antara  $S_s$  dapat dilakukan interpolasi linier
- b.  $SS^b$  = situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik

**Tabel 3. 7 Faktor amplifikasi percepatan pada getaran periode 1 detik ( $F_v$ )**

Kelas Situs	Parameter respons spectral percepatan gempa ( $MCE_R$ ) terpetakan pada perioda pendek, $T=0,2$ detik, $S_s$				
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 \geq 0,5$
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 Hal 22)

Catatan:

- a. Untuk nilai-nilai antara  $S_I$  dapat dilakukan interpolasi linier
- b.  $SS^b$  = situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik

### 3.7.6 Parameter Percepatan Spektra Desain

Parameter percepatan spectra desain untuk periode pendek,  $SDS$  dan periode 1 detik,  $SDI$ , ditentukan dengan perumusan berikut ini.

$$S_{DS} = 2/3 S_{MS} \quad (3-3)$$

$$S_{DI} = 2/3 S_{MI} \quad (3-4)$$

### 3.7.7 Spektrum Respons Desain

Dalam mendesain spektrum respon, ketentuan-ketentuannya adalah sebagai berikut.

1. Untuk periode yang lebih kecil dari  $T_0$ , spektrum respons percepatan desain,  $S_a$ , harus diambil dari Persamaan:

$$S_a = S_{DS} \left( 0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (3-5)$$

2. Untuk periode lebih besar dari atau dengan  $T_0$  dan lebih kecil dari atau sama dengan  $T_s$ , spektrum respons percepatan desain,  $S_a$ , sama dengan  $S_{DS}$ .
3. Untuk periode lebih besar dari  $T_s$ , spektrum respons percepatan desain,  $S_a$ , diambil berdasarkan Persamaan:

$$S_a = \left( \frac{S_{D1}}{T} \right) \quad (3-6)$$

Keterangan:

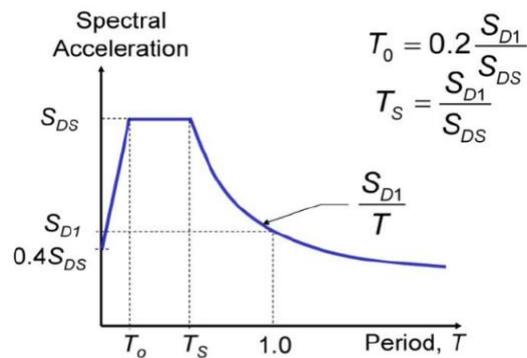
$S_{DS}$  = Parameter respons spectra percepatan desain pada periode pendek

$S_{D1}$  = Parameter respons spectra percepatan desain pada periode 1 detik

$T$  = Periode getar fundamental struktur

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$$

Grafik spektrum respons desain dapat dilihat pada Gambar 3.5.



**Gambar 3. 5 Spektrum respon desain**

### 3.7.8 Kategori Desain Seismik

Bangunan memiliki kategori desain seismic berdasarkan kategori risiko bangunan serta nilai  $S_{DS}$  dan  $S_{D1}$ , sesuai Tabel 3.8 dan Tabel 3.9.

**Tabel 3. 8 Kategori desain seismik berdasarkan parameter respon percepatan pada periode pendek**

Nilai $S_{DS}$	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{DS} \leq 0.167$	A	A
$0.167 \leq S_{DS} < 0.33$	B	C
$0.33 \leq S_{DS} < 0.50$	C	D
$0.50 \leq S_{DS}$	D	D

(Sumber: SNI 1726 2012 Hal 24)

**Tabel 3. 9 Kategori desain seismik berdasarkan parameter respon percepatan pada periode 1 detik**

Nilai $S_{D1}$	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{D1} \leq 0.167$	A	A
$0.067 \leq S_{D1} < 0.133$	B	C
$0.33 \leq S_{D1} < 0.20$	C	D
$0.20 \leq S_{D1}$	D	D

(Sumber: SNI 1726 2012 Hal 25)

### 3.7.9 Sistem Struktur

Sistem struktur yang ditetapkan disesuaikan dengan Batasan sistem struktur dan Batasan ketinggian struktur yang diijinkan. Faktor R, Cd, dan  $\Omega_0$  untuk sistem penahan beban lateral ditentukan berdasarkan Tabel 3.10.

Tabel 3. 10 Faktor R,  $C_d$ , dan  $\Omega_o$  untuk sistem penahan gaya gempa

Sistem penahan gaya seismik	Koefisien modifikasi respons,	Faktor kuat lebih sistem	Faktor pembesaran defleksi	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, $h_n$ , (m) <sup>c</sup>				
				Kategori desain seismik				
	$R^a$	$\Omega_o^g$	$C_d^b$	B	C	D <sup>d</sup>	E <sup>d</sup>	F <sup>e</sup>
C. Sistem Rangka Pemikul Momen								
1. Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5.5	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	5.5	TB	TB	48	30	TI
3. Rangka baja pemikul momen menengah	4.5	3	4	TB	TB	10 <sup>n.i</sup>	TI <sup>n</sup>	TI <sup>i</sup>
4. Rangka baja pemikul momen biasa	3.5	3	3	TB	TB	TI <sup>n</sup>	TI <sup>n</sup>	TI <sup>i</sup>
5. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	8	3	5.5	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4.5	TB	TB	TI	TI	TI
7. Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2.5	TB	TI	TI	TI	TI
8. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5.5	TB	TB	TB	TB	TB
9. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4.5	TB	TB	TI	TI	TI

(Sumber: SNI 1726 2012 Hal 34)

### 3.7.10 Periode Fundamental Struktur ( $T$ )

Periode fundamental struktur,  $T$ , tidak boleh melebihi hasil koefisien untuk Batasan atas pada periode yang dihitung ( $C_u$ ). Periode fundamental pendekatan,  $T_a$ , dan periode fundamental batas atas  $T_{maks}$  dihitung dengan Persamaan bersamaan berikut ini.

$$T_a = C_t \cdot h_{nx} \quad (3-7)$$

$$T_{maks} = C_u \cdot T_a \quad (3-8)$$

Keterangan:

$h_n$  = Ketinggian struktur dari dasar sampai tingkat tertinggi (m)

$C_u$  = Koefisien periode batas yang ditentukan dari Tabel 3.11

$C_t$  dan  $x$  = Koefisien parameter pendekatan yang ditentukan dari Tabel 3.12

Selain memakai Persamaan diatas, periode fundamental struktur,  $T$ , juga ditentukan dari analisi modal mode 1 pada SAP2000 ( $T_c$ ).

$T_c$  = Periode fundamental struktur dari analisis modal mode 1 pada SAP2000

**Tabel 3. 11 Koefisien untuk batas atas pada periode yang dihitung**

Parameter percepatan respons spektral desain pada 1 detik $S_{D1}$	Koefisien $C_u$
$\geq 0.4$	1.4
0.3	1.4
0.2	1.5
0.15	1.6
$\leq 0.1$	1.7

(Sumber: SNI 1726 2012 Hal 56)

**Tabel 3. 12 Nilai parameter periode pendekatan  $C_t$  dan  $x$**

Tipe Struktur	$C_t$	$X$
Sistem rangka pemikul momen di mana rangka memikul 100 persen gaya gempa yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya gempa:		
Rangka baja pemikul momen	0.0724	0.8
Rangka beton pemikul momen	0.0466	0.9
Rangka baja dengan bresing eksentris	0.0731	0.75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0.0731	0.75
Semua sistem struktur lainnya	0.0488	0.75

(Sumber: SNI 1726 2012 Hal 56)

### 3.7.11 Geser Dasar Seismik ( $V$ )

Geser dasar seismic,  $V$ , ditentukan dengan Persamaan berikut dalam arah yang ditetapkan.

$$V = C_s \cdot W \quad (3-9)$$

Keterangan:

$C_s$  = Koefisien respons seismic

$W$  = Berat seismic efektif

### 3.7.12 Koefisien Respons Seismik ( $C_s$ )

Koefisien respons seismic,  $C_s$ , ditentukan sesuai Persamaan berikut.

$$C_s = \frac{SDS}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3-10)$$

Keterangan:

$SDS$  = Parameter percepatan spektrum respons desain dalam rentang periode pendek

$R$  = Faktor modifikasi respons

$I_e$  = Faktor keutamaan gempa

Nilai  $C_s$  yang dihitung sesuai dengan Persamaan (3-10) tidak perlu melebihi berikut ini.

$$C_s = \frac{SDS}{T\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3-11)$$

$C_s$  harus tidak kurang dari:

$$C_s = 0,44 \cdot SDS \cdot I_e \geq 0,01 \quad (3-12)$$

### 3.7.13 Distribusi Vertikal Gaya Gempa

Gaya gempa lateral ( $F_i$ ) yang timbul di semua tingkat harus ditentukan dari Persamaan berikut.

$$F_i = C_{vx} \cdot V \quad (3-13)$$

$$C_{vx} = \frac{W_x \cdot h_x^k}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot h_i^k} \quad (3-14)$$

Keterangan:

$F_i$  = Gaya horizontal gempa (ton)

$C_{vx}$  = Faktor distribusi vertikal

$V$  = Gaya lateral desain total atas geser di dasar struktur ( $W$ ) (ton)

$w_i$  dan  $w_x$  = Bagian berat seismic efektif total struktur ( $W$ ) yang ditempatkan atau dikenakan pada tingkat  $i$  atau  $x$

$h_i$  dan  $h_x$  = Tinggi dari dasar sampai tingkat  $i$  atau  $x$  (m)

$k$  = Eksponen yang terkait dengan periode struktur.

untuk struktur yang mempunyai periode sebesar 0,5 detik atau kurang,  $k = 1$

untuk struktur yang mempunyai periode sebesar 2,5 detik atau kurang,  $k = 2$

untuk struktur yang mempunyai periode antara 0,5 detik dan 2,5 detik,  $k$  harus diambil sebesar 2 atau harus ditentukan dengan interpolasi linier antara 1 dan 2

### 3.7.14 Distribusi Horizontal Gaya Gempa

Geser tingkat desain gempa di semua tingkat ( $V_x$ ) (ton) harus ditentukan dari Persamaan berikut.

$$V_x = \sum_{i=x}^n F_i \quad (3-15)$$

Keterangan:

$F_i$  = Bagian dari geser seismic  $V$  yang timbul di tingkat  $i$  (ton)

### 3.8 Analisis Nonlinier Statik (*Pushover Analysis*)

Yunus (2015) menjelaskan bahwa dengan membandingkan gaya gempa yang terjadi pada bangunan dengan kapasitas bangunan tersebut, maka kinerja bangunan akan diketahui. Analisis non-linier inelastik statik atau lebih dikenal dengan *pushover analysis* dilakukan untuk mengetahui lebih detail letak sendi plastis pada bangunan. Pada analisis nonlinier statik, model matematika dari struktur yaitu dengan menggunakan beban (*load*) yang mempunyai karakteristik nonlinier dari setiap komponen dan elemen bangunan. Beban nonlinier tersebut berupa beban lateral gempa yang akan terus ditambah yang merepresentasikan gaya inersia sampai target perpindahan (*displacement*) tercapai.

Menurut Pranata (2006), analisis beban statik dorong (*pushover analysis*) adalah suatu analisis nonlinier statik berupa beban-beban statik termasuk pengaruh gempa rencana terhadap struktur bangunan gedung yang terletak 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 bangunan gedung, kemudian dengan peningkatan beban lebih lanjut mengalami perubahan bentuk pasca elastis yang besar sampai mencapai kondisi plastik. Analisis *pushover* dilakukan untuk mengetahui batas maksimum gaya

dan deformasi yang dapat ditahan oleh struktur sampai komponen-komponen struktur tersebut leleh dan dalam keadaan plastis.

Satyarno dan Nawangalam (2009) menjelaskan, Pengertian nonlinieritas pada analisis *pushover* terjadi jika suatu bahan mengalami regangan di luar batas proporsional meliputi nonlinieritas pada material atau bahan (*material nonlinierity*), maka hubungan antara tegangan dan regangan tidak lagi linier, contoh pada sendi plastis balok.

Menurut Satyarno (2000) parameter yang digunakan dalam mengevaluasi bangunan antara lain:

1. Periode getar alami,  $T_1$  (*Fundamental period*)
2. Kapasitas geser dasar,  $V_{base}$  (*Base shear capacity*)
3. Periode efektif struktur,  $T_{eff}$  (*Effective Period*)
4. Kapasitas daktilitas struktur,  $\mu$  (*Structure's ductility capacity*)
5. Kapasitas perpindahan lateral struktur,  $\delta_u$  (*Structure's lateral displacement capacity*)

Cara menentukan target perpindahan untuk menentukan titik kinerja bangunan dalam penelitian ini yaitu dengan analisis *pushover* metode koefisien perpindahan atau *displacement coefficient method* (FEMA 356) dengan bantuan program komputer SAP2000 v.14 yang telah *built-in*.

Dewabroto (2005) menjelaskan, tahapan utama dalam melakukan analisis *pushover* adalah sebagai berikut.

1. Menentukan titik kontrol untuk memonitor besarnya perpindahan struktur. Kurva *pushover* didapatkan dengan cara menyusun rekaman besarnya perpindahan titik kontrol dan gaya geser dasar.
2. Membuat kurva *pushover* dari distribusi gaya inersia yang ekuivalen dengan berbagai pola distribusi gaya lateral, sehingga diharapkan deformasi yang terjadi hampir sama dengan gempa sebenarnya. Untuk mendapatkan kondisi yang paling menentukan, maka perlu dibuat beberapa pola pembebanan lateral karena sifat gempa yang tidak pasti.
3. Estimasi besarnya target perpindahan. Titik kontrol didorong sampai target tertentu, yaitu suatu perpindahan maksimum yang diakibatkan oleh intensitas gempa rencana yang ditentukan.

4. Mengevaluasi level kinerja struktur ketika titik kontrol tepat berada pada target perpindahan yang merupakan hal utama dari perencanaan berbasis kinerja. Komponen struktur dianggap memuaskan jika memenuhi persyaratan deformasi dan kekuatan.

### 3.9 Metode Koefisien Perpindahan (FEMA 356)

Metode koefisien perpindahan merupakan metode dalam FEMA 356 yang digunakan untuk prosedur statik nonlinier. Penyelesaian dilakukan dengan memodifikasi  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ , dan  $C_3$ , sehingga diperoleh perpindahan global maksimum (elastis dan inelastik) yang disebut target perpindahan ( $\delta_T$ ). Proses dimulai dengan menetapkan waktu getar efektif ( $T_e$ ) yang memperhitungkan kondisi inelastik bangunan. Perpindahan tersebut dapat dihitung dengan Persamaan berikut.

$$\delta_1 = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_a \cdot \left(\frac{T_e}{4\pi}\right)^2 \cdot G \quad (3-16)$$

keterangan:

$T_e$  = Waktu getar alami efektif yang memperhitungkan kondisi inelastis.

$C_0$  = Koefisien faktor bentuk, untuk mengubah perpindahan spektral menjadi atap, umumnya memakai faktor partisipasi ragam yang pertama (*first mode participation factor*) atau berdasarkan Tabel 3.2 (FEMA 356), seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.13.

$C_1$  = Faktor modifikasi yang menghubungkan perpindahan inelastik maksimum dengan perpindahan yang dihitung dari respon elastik linier.

$$\begin{aligned} &= 1,0 \text{ untuk } T_e \geq T_s \\ &= \frac{[1+(R-1)\frac{T_e}{T_s}]^2}{R}, \text{ untuk } T_e < T_s \end{aligned}$$

$T_s$  = Waktu getar karakteristik yang diperoleh dari kurva respon spektrum pada titik yang terdapat transisi bagian akselerasi konstan ke bagian kecepatan konstan.

$R$  = Rasio “kuat elastik perlu” koefisien kuat leleh, dihitung dengan Persamaan (3.16).

$$= \frac{S_a}{V_y/W} C_m \quad (3-17)$$

$S_a$  = Akselerasi respon spektrum yang berkesesuaian dengan waktu getar alami efektif pada arah yang ditinjau.

$V_y$  = Gaya geser pada saat leleh dari idealisasi kurva *pushover* menjadi bilinear.

$W$  = Total beban mati dan beban hidup yang dapat direduksi.

$C_m$  = Faktor massa efektif yang diambil dari Tabel 3.1 dari FEMA 356, seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 3.14.

$C_2$  = Koefisien untuk memperhitungkan efek “*pinching*” dari hubungan beban deformasi akibat degradasi kekakuan dan kekuatan berdasarkan Tabel 3.3 dari FEMA 356 yang ditunjukkan dalam Tabel 3.15.

$C_3$  = Koefisien untuk memperhitungkan pembesaran lateral akibat adanya efek P- $\Delta$ . Koefisien diperoleh dari secara empiris dari studi statistik analisa riwayat waktu nonlinier dari SDOF dan diambil berdasarkan pertimbangan *engineering judgement*, dimana perilaku hubungan gaya geser dasar lendutan pada kondisi pasca leleh kekakuannya positif (kurva meningkat), maka  $C_3 = 1$ , sedangkan jika perilaku pasca lelehnya negative (kurva menurun).

$$= 1 + \frac{|\alpha|(R-1)^{3/2}}{T_e} \quad (3-18)$$

$\alpha$  = Rasio kekuatan pasca leleh terhadap kekakuan elastik efektif dimana hubungan gaya lendutan diidealisasikan sebagai kurva bilinear.

$g$  = Percepatan gravitasi 9,81 m/det<sup>2</sup>.

**Tabel 3. 13 Nilai untuk faktor modifikasi  $C_0^1$  (FEMA 356, 2000)**

Jumlah Tingkat	Bangunan Geser <sup>2</sup>		Bangunan Lainnya
	<i>Triangular load pattern (1.2,1.2,1.3)</i>	<i>Uniform load pattern (2.1)</i>	<i>Any load pattern</i>
1	1.0	1.0	1.0
2	1.2	1.15	1.2
3	1.2	1.2	1.3
5	1.2	1.2	1.4
10+	1.3	1.2	1.5

1. Interpolasi linier harus digunakan untuk menghitung nilai tengah-tengah.  
2. Untuk seluruh lantai pada bangunan, *interstory drift* menurun dengan bertambahnya tingkat/lantai.

Tabel 3. 14 Nilai untuk faktor massa efektif  $C_m^1$  (FEMA 356, 2000)

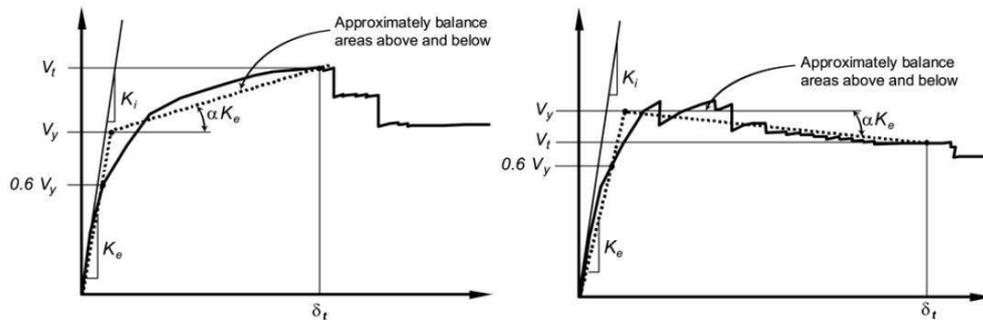
Number of story	Concrete moment frame	Concrete shear wall	Concrete pier-sprandel	Steel moment frame	Steel concentric braced frame	Steel eccentric braced frame	Other
1-2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
3 or more	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0

$C_m$  harus diambil sebesar 1.0 jika waktu getar alami ( $T$ ) lebih besar dari 1.0 detik

Tabel 3. 15 Nilai untuk faktor massa efektif  $C_2$  (FEMA 356, 2000)

Level Kinerja Struktur	$T \leq 0.1$ detik <sup>3</sup>		$T \geq T_s$ detik <sup>3</sup>	
	Tipe Rangka 1 <sup>1</sup>	Tipe Rangka 2 <sup>2</sup>	Tipe Rangka 1 <sup>1</sup>	Tipe Rangka 2 <sup>2</sup>
Immediate occupancy	1.0	1.0	1.0	1.0
Life safety	1.3	1.0	1.1	1.0
Collapse prevention	1.5	1.0	1.2	1.0

1. Struktur dengan lebih dari 30% pada geser tingkat di setiap level ditahan oleh beberapa kombinasi antara komponen, elemen atau rangka.
2. Semua rangka yang tidak termasuk Tipe Rangka 1.
3. Interpolasi linier harus digunakan untuk nilai Tengah  $T$ .



a. Kemiringan pasca leleh – positif      b. kemiringan pasca leleh - negatif

Gambar 3. 6 Perilaku pasca leleh sistem struktur (FEMA 356, 2000)

Pada Gambar 3.6 menjelaskan hubungan perpindahan gaya nonlinier antara gaya geser dasar dan perpindahan titik kontrol harus diganti dengan hubungan ideal untuk menghitung kekuatan lateral efektif ( $K_e$ ) dan kekuatan leleh efektif ( $V_y$ ) dari bangunan. Hubungan ini harus bilinear dengan kemiringan awal ( $K_e$ ) dan kemiringan pasca leleh ( $\alpha$ ). Segmen garis pada kurva perpindahan gaya ideal ditempatkan

menggunakan prosedur grafis *iterative* yang kira-kira menyeimbangkan area di atas dan di bawah kurva. Kekakuan lateral ( $K_e$ ) yang efektif harus dianggap sebagai kekakuan *secant* yang dihitung pada gaya geser dasar sama dengan 60% dari kekuatan leleh efektif struktur. Kemiringan pasca leleh ( $\alpha$ ) ditentukan oleh garis yang melewati kurva aktual pada perpindahan target yang dihitung. Kekuatan leleh efektif tidak boleh dianggap lebih besar dari gaya geser dasar maksimum pada setiap titik sepanjang kurva sebenarnya.

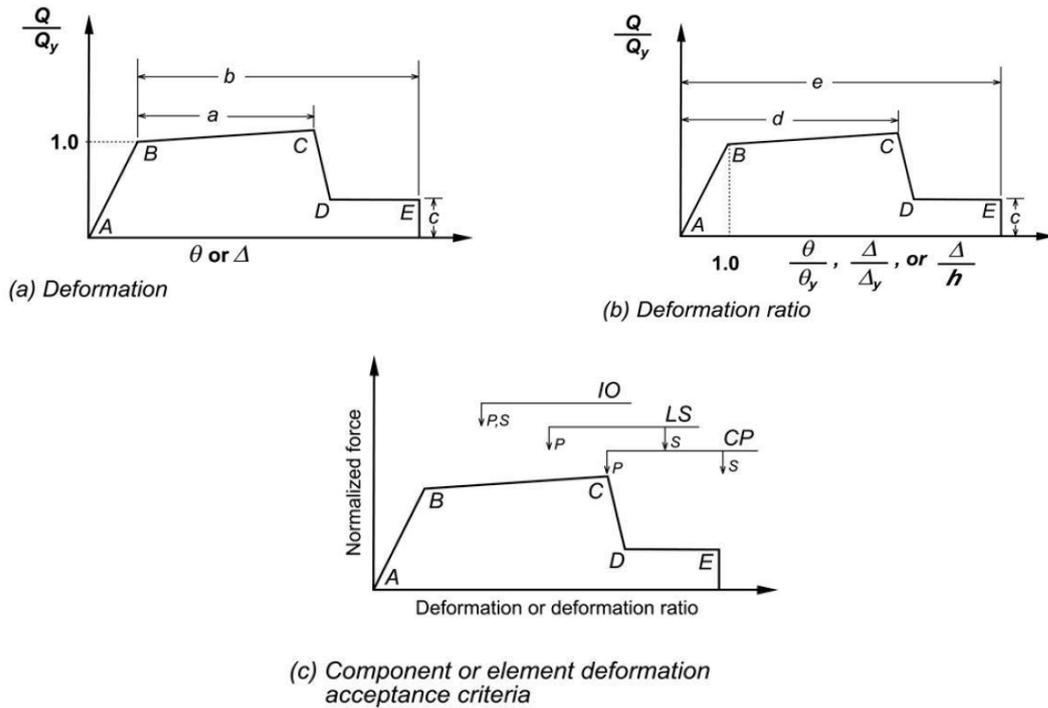
Dalam metode koefisien perpindahan FEMA 356 perlu diketahui 3 hal yang menjadi dasar dalam evaluasi dengan menggunakan metode ini yaitu sebagai berikut.

1. Kriteria penerimaan komponen pada prosedur analisis nonlinier

Kriteria penerimaan komponen yang digunakan oleh FEMA 356 (2000) untuk prosedur nonlinier dan *deformation controlled* adalah deformasi pada titik-titik yang terdapat dalam alternatif kurva hubungan gaya ( $Q$ ) dan deformasi ( $\Delta$ ) yang dapat dilihat pada Gambar 3.7. Respon linier digambarkan diantara titik A (tanpa beban) dan titik B sebagai leleh efektif. Kemiringan antara titik B dan C adalah presentase kecil (0-10%) dari kemiringan elastik, termasuk memperlihatkan terjadinya *strain hardening*. Titik C mempunyai sebuah ordinat yang menunjukkan kekuatan ultimit elemen struktur dan deformasi akibat kekuatan yang berkurang (garis CD). Dari titik D kekuatan elemen akan terus berkurang sampai titik E. Pada deformasi setelah titik E kekuatan komponen menjadi nol. Kurva tersebut diperoleh dari *backbone curve* dari data pengujian. Dari kurva tersebut, diketahui deformasi target (*target displacement*) pada gedung dan level kondisi bangunan. Kriteria penerimaan untuk komponen primer adalah sebagai berikut.

- a. *Immediate occupancy*: deformasi pada bagian yang permanen, yaitu kerusakan yang tampak pada saat pengujian (*experiment*) tetapi tidak lebih besar dari 0,67 kali batas deformasi untuk *life safety*.
- b. *Life safety*: 0,75 kali deformasi pada titik C dalam kurva.
- c. *Collapse prevention*: deformasi pada titik C dalam kurva, tetapi tidak lebih besar dari 0,75 kali deformasi pada titik E.

Hubungan antara beban dan deformasi hasil analisis menggunakan *pushover* terlihat pada Gambar 3.7.



**Gambar 3. 7 Hubungan beban-deformasi dan kriteria batas penerimaan deformasi pada komponen (FEMA 356, 2000)**

2. Batas *drift ratio* untuk level kinerja menurut FEMA 356 (2000)

Hubungan antara level kinerja struktur dengan simpangan (*drift*) pada elemen vertikal dari sistem pemikul beban lateral berupa struktur rangka beton bertulang (*concrete frames*) dapat dilihat pada Tabel 3.16. Simpangan pada struktur gedung, nilai simpangan pada tabel tersebut merupakan nilai-nilai tipikal yang diberikan untuk menjelaskan respon struktur keseluruhan yang sesuai dengan berbagai level kinerja struktur.

**Tabel 3. 16 Batasan *drift ratio* untuk level kinerja (FEMA 356, 2000)**

Level kinerja struktur	<i>Drift</i> (%)	Keterangan
<i>Immediate occupancy</i>	1,0	<i>Transient</i>
<i>Life safety</i>	2,0	<i>Transient</i>
	1,0	<i>Permanent</i>
<i>Collapse prevention</i>	4,0	<i>Transient</i> atau <i>permanent</i>

### 3. Waktu getar alami efektif struktur ( $T_e$ )

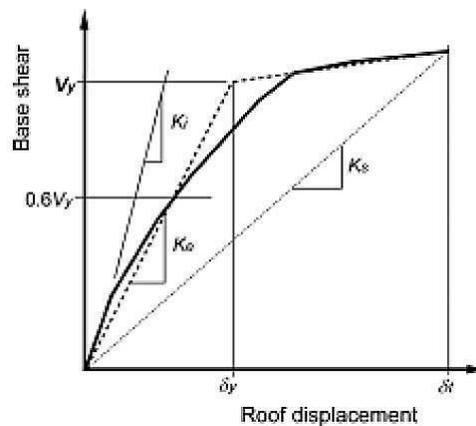
Waktu getar alami efektif struktur diperhitungkan pada saat struktur dalam kondisi inelastik pada saat gempa maksimum. Waktu getar alami efektif struktur ( $T_e$ ) dapat diperoleh dengan bantuan kurva hasil analisa *pushover*. Kurva *pushover* diubah menjadi kurva bilinear untuk mengestimasi kekakuan lateral efektif yang diambil dari kekakuan *secant* yang dihitung dari gaya geser dasar sebesar 60% dari kuat leleh. Karena kuat leleh diperoleh dari titik potong kekakuan lateral efektif pada kondisi elastis ( $K_e$ ) dan kondisi inelastik ( $\alpha K_e$ ), maka prosesnya dilakukan secara *trial-error*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.8. Selanjutnya waktu getar alami efektif ( $T_e$ ) dihitung dengan Persamaan (3-19).

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (3-19)$$

Keterangan:

$T_i$  = periode alami awal elastis detik pada arah yang ditinjau

$K_i$  = kekakuan awal bangunan pada arah yang ditinjau



**Gambar 3. 8 Parameter waktu getar fundamental efektif dari kurva *pushover* (FEMA 356)**

### 3.10 Sendi Plastis

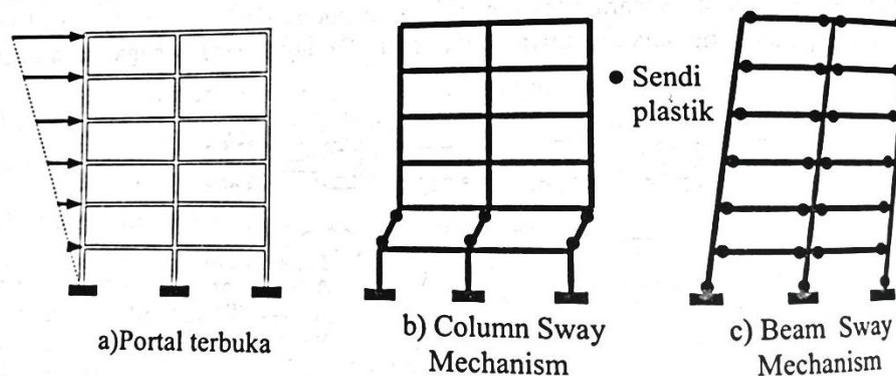
Yunus (2015) menjelaskan, ketika besar gaya geser dan gaya lentur yang terjadi akibat gempa bumi, lebih besar daripada kapasitas elemen struktur tersebut, maka akan terjadi sendi plastis. Sendi plastis terjadi ditandai dengan adanya tulangan baja plastis atau yang sudah leleh dan tidak mampu lagi ke bentuk semula. Simulasi

pembebanan secara bertahap dilakukan sampai tulangan baja pada beton menjadi leleh dan berlanjut hingga bangunan runtuh.

Pada suatu tampang akan terjadi tegangan jika dikenakan gaya atau banyak gaya. Tegangan tersebut meningkat seiring dengan peningkatan gaya-gaya yang terjadi pada tampang sampai tegangan leleh terjadi pada penampang dan gaya-gaya yang didukung tidak dapat ditingkatkan lagi kemudian tampang akan terdefleksi atau berotasi terus (*plastic flow*) pada gaya yang konstan. Daerah dimana tampang sudah tidak mampu lagi menahan kenaikan gaya yang lebih besar disebut sendi plastis (*plastic hinges*) (Satyarno, 2012).

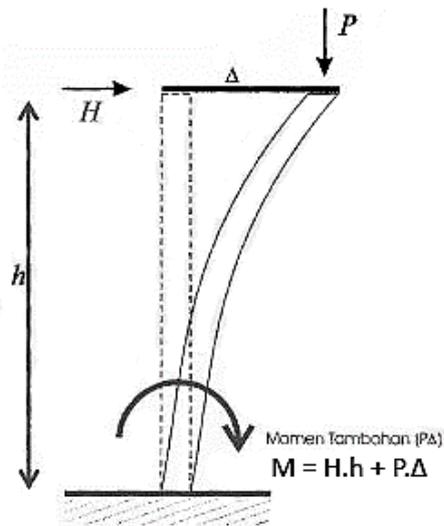
Ulfa (2012) menjelaskan ada dua kemungkinan respon sendi plastis yaitu:

1. Sendi plastis terjadi di dasar kolom/dinding bawah (*beam sway*) dan ujung-ujung balok (Gambar 3.9c). Tidak ada efek  $P-\Delta$  (sangat kecil) pada pola ini yang berarti tidak begitu bahaya dan memerlukan banyak sendi plastik untuk mencapai taraf keruntuhan bangunan.
2. Sendi plastis terjadi pada kolom (*column sway*) (Gambar 3.9b). Ada efek  $P-\Delta$  pada pola ini (lihat Gambar 3.10), maka akan berbahaya jika terjadi dan memicu terjadinya keruntuhan pada bangunan.



**Gambar 3. 9 Mekanisme Runtuh pada Portal Terbuka**

(Sumber: Widodo, 2012)



**Gambar 3. 10 Efek P-Δ**

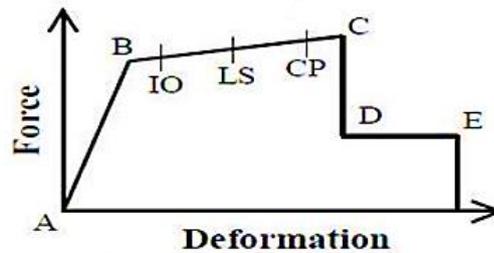
### 3.10.1 Pemodelan Sendi

Perilaku nonlinier *force – displacement* dan atau momen rotasi yang didapat, ditempatkan sepanjang bentang kolom, balok atau *x-bracing* pada beberapa tempat yang berbeda merupakan fungsi definisi dari pemodelan sendi. Pemodelan sendi adalah rigid dan tidak memiliki efek pada perilaku linear pada member.

Pada studi ini, input data *hinge properties* berupa analisis momen plastis dilakukan secara *auto* atau *default* pada Program SAP2000 untuk elemen struktur yang tidak mengalami pembesaran atau perkuatan. Sedangkan, sebaliknya definisi sendi plastis dianalisis dengan bantuan program Response2000. Tujuan pemodelan sendi pada elemen struktur yaitu untuk mendefinisikan perilaku nonlinear *force-deformation*. Karakteristik deformasi elemen struktur sangat penting untuk mensimulasikan pembentukan sendi plastis dalam proses pembentukan kurva kapasitas hasil analisis *pushover*. (Erlangga, 2017)

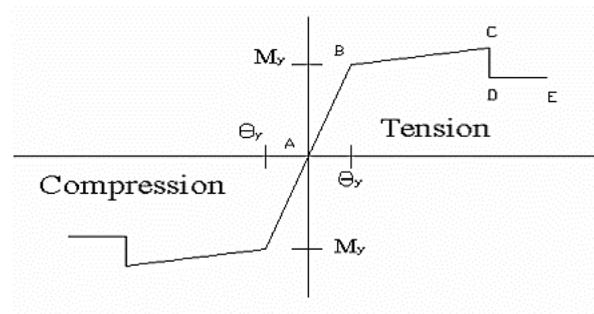
Hubungan gaya dengan perpindahan yang ditampilkan pada Gambar 3.11 menunjukkan perilaku sendi plastis pada FEMA 356. Grafik tersebut juga berlaku untuk hubungan momen dengan rotasi. Properti sendi yang digunakan dapat dihitung secara otomatis dengan *automatic hinge* dalam program SAP2000 v.14 sesuai material dan properti penampang yang digunakan sesuai FEMA 356. Dalam analisa, elemen struktur kolom dan *x-bracing* menggunakan tipe sendi *default – PMM* dengan mempertimbangkan struktur kolom mendapat gaya aksial dan momen, sedangkan

struktur balok menggunakan tipe sendi *default* M3 dengan mempertimbangkan balok menahan momen pada sumbu kuat (Gambar 3.12). Nilai yang tertera pada kriteria penerimaan untuk *Immediate Occupancy*, *Life Safety*, dan *Collapse Prevention*, merupakan nilai yang diambil berdasarkan FEMA 356 (2000) ditunjukkan pada Gambar 3.11.



**Gambar 3. 11 Hubungan *force-deformation***

(Sumber: FEMA 356, 2000)



**Gambar 3. 12 *Default* sendi plastis M3 dan P-MM**

Notasi A, B, IO, LS, CP, C, D dan E yang ditunjukkan pada Gambar 3.11 adalah titik kontrol perpindahan yang memberikan informasi kinerja struktur. Pada interval A ke B merupakan batas dari kondisi elastik. Pada interval B ke C, terdapat titik-titik IO, LS dan CP yang menyatakan tingkat kinerja dari struktur tersebut. Sedangkan titik C mewakili kapasitas ultimit, D mewakili kekuatan sisa dan titik E mewakili kegagalan total. Tingkat kinerja struktur dijelaskan sebagai berikut:

1. *Operation* / Operasi. Pada level ini bangunan dapat berfungsi dengan baik, tidak terdapat kerusakan berarti pada komponen struktural maupun nonstruktural.
2. *Immediate Occupancy* (IO) / Segera difungsikan. Ditandai dengan kerusakan kecil pada struktur bangunan. Resiko korban jiwa sangat rendah dan mungkin

dibutuhkan sedikit perbaikan pada struktur akan tetapi secara umum bangunan dapat segera digunakan kembali.

3. *Life Safety (LS)* / Keselamatan pengguna. Ditandai dengan adanya kerusakan yang cukup signifikan pada struktur, tetapi tidak mengalami keruntuhan parsial ataupun total. Korban jiwa mungkin ada akan tetapi dalam jumlah yang sedikit. Struktur tetap bisa diperbaiki walaupun secara ekonomi mungkin tidak menguntungkan.
4. *Collapse Prevention (CP)* / diambang keruntuhan. Ditandai dengan adanya kerusakan yang parah pada struktur. Setelah terjadi gempa, struktur berada diambang keruntuhan baik sebagian ataupun keseluruhan. Bagaimanapun, struktur harus tetap mampu menahan beban gravitasi. Korban jiwa yang cukup signifikan akibat reruntuhan puing bangunan. Pada level ini struktur tidak memungkinkan lagi untuk diperbaiki.

### **3.10.2 Prediksi Letak Kerusakan**

Yunus (2015) menyatakan dalam Tesisnya sebagai berikut.

Elemen struktur mempunyai batas layan tertentu dalam menahan gaya yang bekerja. Elemen struktur tersebut menjadi rusak jika sudah melampaui batas layannya yang biasanya ditandai dengan keretakan pada beton dan tulangan didalamnya sudah leleh.

Dalam analisis *pushover* setiap elemen struktur dengan beban *pushover* tertetu dapat diketahui perpindahan dan sendi plastisnya dengan cara melihat hasil analisis SAP2000, sehingga dapat diketahui letak kerusakan. Suatu elemen struktur rusak atau tidaknya mengacu pada evaluasi nilai rasio perpindahan (*drift ratio*) dan dengan melihat elemen struktur yang mengalami kondisi sendi plastis level tertentu sesuai dengan level kinerja, maka elemen struktur yang rusak dapat diprediksi.