

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Gempa Bumi

Gempa bumi adalah getaran atau guncangan yang terjadi pada permukaan bumi yang diakibatkan oleh proses pelepasan energi dari bawah permukaan bumi secara tiba-tiba sehingga menciptakan gelombang seismik. Energi yang terlepas dari bawah permukaan bumi dapat berupa energi potensial, energi kinetik, energi kimia, atau energi regangan elastis. Gempa bumi umumnya disebabkan oleh gesekan atau benturan antar lempeng-lempeng bumi (pelat tektonik) atau dapat juga disebabkan oleh aktivitas vulkanik yang terjadi pada gunung-gunung berapi yang masih aktif. Di bumi ini terdapat beberapa jenis gempa bumi yang diklasifikasikan berdasarkan penyebab terjadinya gempa bumi tersebut. Jenis-jenis gempa bumi yang dimaksud di antaranya adalah (Salim, 2018):

a) **Gempa Tektonik**

Gempa tektonik adalah gempa yang disebabkan oleh gesekan atau benturan antar lempeng-lempeng bumi (pelat tektonik) yang terdapat di dalam lapisan permukaan bumi. Akibat gesekan atau benturan tersebut, terjadilah pelepasan energi regangan elastis yang menimbulkan getaran atau guncangan yang terjadi pada permukaan bumi.

b) **Gempa Vulkanik**

Gempa vulkanik adalah gempa yang disebabkan oleh aktivitas vulkanik, yaitu getaran tanah yang disebabkan oleh aktivitas desakan magma ke permukaan bumi yang memicu terjadinya letusan gunung berapi. Gempa vulkanik dapat terjadi baik sebelum, saat, maupun sesudah letusan gunung berapi terjadi. Gempa vulkanik terjadi di daerah sekitar aktivitas gunung berapi.

c) Gempa Runtuhan

Gempa runtuhan adalah gempa yang disebabkan oleh runtuhnya tanah di daerah pegunungan atau dataran tinggi sehingga akan menimbulkan getaran atau guncangan di sekitar runtuhan tanah tersebut.

d) Gempa Imbasan

Gempa imbasan adalah gempa yang umumnya terjadi di sekitar dam yang diakibatkan karena adanya fluktuasi air dam.

e) Gempa Buatan

Gempa buatan adalah gempa yang terjadi akibat perilaku manusia seperti ledakan nuklir atau ledakan untuk mencari bahan mineral.

Dari kelima jenis gempa bumi tersebut, gempa tektonik memiliki skala yang jauh lebih besar dibandingkan dengan jenis gempa bumi lainnya, sehingga gempa tersebut menimbulkan pengaruh yang lebih besar terhadap struktur bangunan. Kerusakan yang dapat ditimbulkan oleh gempa bumi tergantung dari besar (*magnitude*) gempa dan durasi gempa, atau banyaknya getaran yang terjadi pada saat gempa berlangsung. Desain struktur dan material yang digunakan untuk struktur bangunan juga dapat berpengaruh terhadap intensitas kerusakan yang terjadi akibat gempa bumi. Level kekuatan gempa bumi bervariasi mulai dari getaran yang ringan, sedang, hingga getaran yang kuat yang dapat dirasakan hingga jarak ribuan kilometer. Gempa bumi dapat mengakibatkan perubahan bentuk dari permukaan bumi, runtuhnya struktur bangunan, atau mengakibatkan terjadinya gelombang pasang yang besar yang disebut dengan fenomena tsunami.

3.2 Perencanaan Beban Gempa dengan Analisis Statik Ekuivalen

Beban gempa merupakan beban yang sangat tidak bisa diprediksi baik besarnya, arahnya, maupun waktu terjadinya. Besarnya beban gempa yang bekerja pada suatu struktur bangunan sangat bergantung pada berat dan kekakuan material struktur, sistem struktur, ketinggian struktur, periode atau waktu getar struktur, kondisi tanah dasar, serta wilayah kegempaan di mana struktur bangunan itu

berdiri (Salim, 2018). Agar beban gempa yang diperhitungkan pada struktur bangunan nilainya tidak terlalu besar dan arahnya cukup dapat diprediksi, serta distribusi beban gempa dapat dilakukan dengan cara yang sederhana, maka ketentuan yang perlu diperhatikan dalam perencanaan struktur bangunan ialah tata letak dari komponen-komponen struktur, perencanaan kapasitas (*capacity design*) dengan konsep *strong column weak beam*, serta pendetailan yang baik dari komponen-komponen struktur yang terdapat pada suatu struktur bangunan. Dengan memenuhi ketentuan-ketentuan tersebut, diharapkan perencanaan struktur bangunan dapat dilakukan dengan cara yang sederhana, aman, dan ekonomis, terutama untuk struktur bangunan yang berada di daerah yang rawan terjadi gempa bumi.

Analisis perencanaan beban gempa yang paling sederhana dan dapat digunakan untuk menentukan pengaruh dari beban gempa terhadap struktur bangunan adalah analisis statik ekuivalen. Analisis statik ekuivalen merupakan suatu metode pendekatan yang dapat merepresentasikan pengaruh dinamik dari beban gempa yang sesungguhnya. Pada analisis statik ekuivalen, struktur bangunan akan dibebani oleh beban gempa nominal statik ekuivalen pada setiap lantai. Terdapat beberapa karakteristik struktur bangunan yang dapat dianalisis dengan menggunakan analisis statik ekuivalen. Karakteristik-karakteristik tersebut diatur dalam SNI 1726-2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-gedung. Berikut ini merupakan karakteristik-karakteristik struktur bangunan yang dapat dianalisis dengan menggunakan analisis statik ekuivalen.

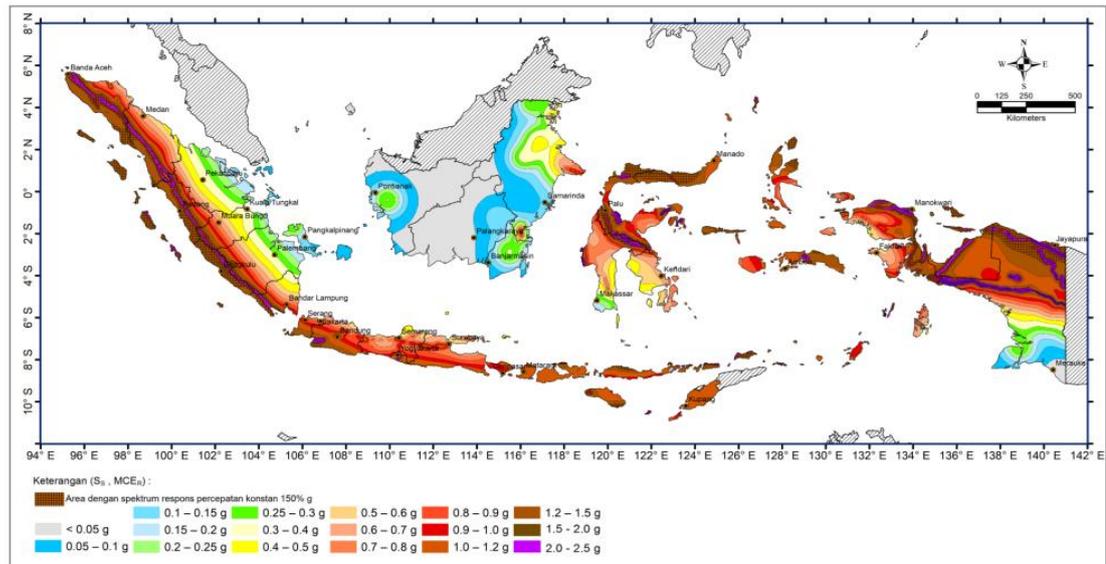
Tabel 3.1 Karakteristik Struktur Bangunan yang dapat Dianalisis dengan Analisis Statik Ekuivalen (SNI 1726-2019)

Kategori Desain Seismik	Karakteristik Struktur Bangunan
B, C	Semua struktur.
D, E, F	Bangunan dengan kategori risiko I atau II yang tidak melebihi 2 tingkat di atas dasar.
	Struktur tanpa ketidakberaturan struktural dan ketinggiannya tidak melebihi 48,8 m.
	Struktur tanpa ketidakberaturan struktural dengan ketinggian melebihi 48,8 m dan $T < 3,5 T_s$.
	Struktur dengan ketinggian tidak melebihi 48,8 m dan hanya memiliki ketidakberaturan horizontal tipe 2,3,4 atau 5 atau ketidakberaturan vertikal tipe 4, 5a atau 5b.

Dalam SNI 1726-2019 juga terdapat tata cara perencanaan dan perhitungan analisis statik ekuivalen. Tujuan akhir dari perhitungan analisis statik ekuivalen adalah untuk mendapatkan nilai beban gempa nominal statik ekuivalen yang akan didistribusikan pada setiap lantai dari struktur bangunan. Sebelum mendapatkan nilai beban gempa nominal statik ekuivalen tersebut, terdapat beberapa tahap perhitungan parameter gempa yang harus dilakukan terlebih dahulu. Berikut ini merupakan parameter-parameter gempa yang harus ditentukan di dalam analisis statik ekuivalen.

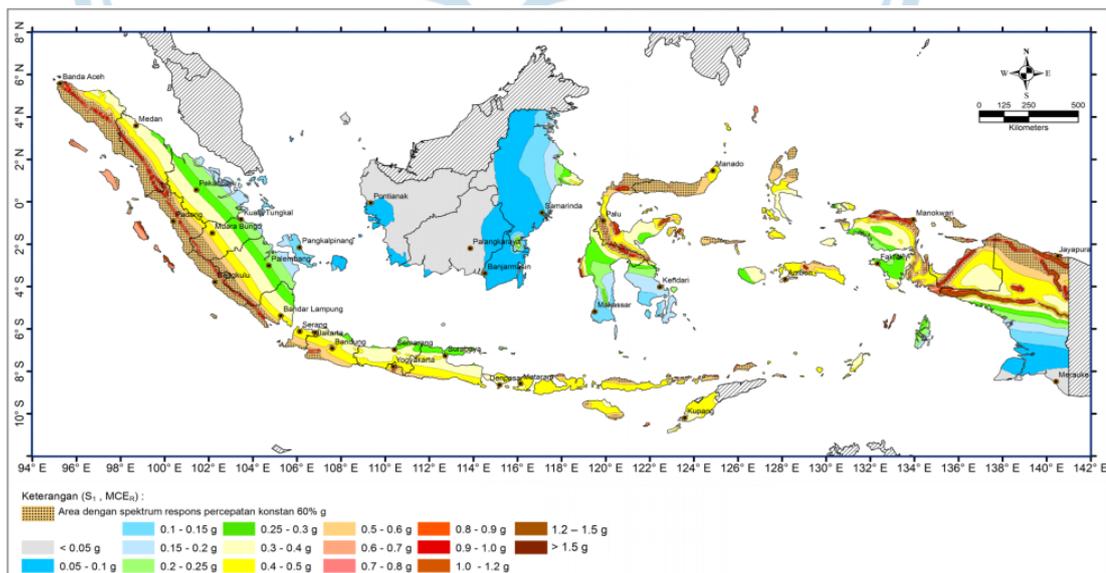
1. Parameter Gerak Tanah S_s dan S_1

S_s = Parameter percepatan respons spektral MCE dari peta gempa pada periode pendek dan redaman 5 persen



Gambar 3.1 Peta Gempa Indonesia untuk Menentukan Nilai S_0

S_1 = Parameter percepatan respons spektral MCE dari peta gempa pada periode 1 detik dan redaman 5 persen



Gambar 3.2 Peta Gempa Indonesia untuk Menentukan Nilai S_1

2. Klasifikasi Kelas Situs

Kelas situs ditentukan berdasarkan parameter-parameter dari tanah dasar.

Tabel 3.2 Klasifikasi Kelas 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	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 : 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $w \geq 40\%$, 3. Kuat geser niralir $\bar{s}_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus,yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m)		

3. Koefisien Situs Fa dan Fv

Fa = Faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek yang nilainya ditentukan berdasarkan nilai S_s

Tabel 3.3 Koefisien Situs Fa

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode pendek, $T = 0,2$ detik, S_s					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s = 1,25$	$S_s \geq 1,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	SS ^(a)					

F_v = Faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik yang nilainya ditentukan berdasarkan nilai S_1

Tabel 3.4 Koefisien Situs F_v

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode 1 detik, S_T					
	$S_T \leq 0,1$	$S_T = 0,2$	$S_T = 0,3$	$S_T = 0,4$	$S_T = 0,5$	$S_T \geq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	SS ^(a)					

4. Parameter Respons Spektral Percepatan S_{MS} dan S_{M1}

Nilai S_{MS} dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$S_{MS} = F_a \cdot S_s \quad (3.1)$$

Keterangan:

S_{MS} = Parameter respons spektral percepatan pada periode pendek (g)

F_a = Faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek yang nilainya ditentukan berdasarkan nilai S_s

S_s = Parameter percepatan respons spektral MCE dari peta gempa pada periode pendek dan redaman 5 persen (g)

Nilai S_{M1} dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$S_{M1} = F_v \cdot S_1 \quad (3.2)$$

Keterangan:

S_{M1} = Parameter respons spektral percepatan pada periode 1 detik (g)

F_v = Faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik yang nilainya ditentukan berdasarkan nilai S_1

S_1 = Parameter percepatan respons spektral MCE dari peta gempa pada periode 1 detik dan redaman 5 persen (g)

5. Parameter Percepatan Spektral Desain S_{DS} dan S_{D1}

Nilai S_{DS} dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} \cdot S_{MS} \quad (3.3)$$

Keterangan:

S_{DS} = Parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek (g)

S_{MS} = Parameter respons spektral percepatan pada periode pendek (g)

Nilai S_{D1} dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$S_{D1} = \frac{2}{3} \cdot S_{M1} \quad (3.4)$$

Keterangan:

S_{D1} = Parameter percepatan spektral desain untuk periode 1 detik (g)

S_{M1} = Parameter respons spektral percepatan pada periode 1 detik (g)

6. T_0 dan T_s

Nilai T_0 dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$T_0 = 0,2 \cdot \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (3.5)$$

Nilai T_s dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (3.6)$$

7. Kategori Risiko

Kategori risiko untuk struktur bangunan dapat ditentukan berdasarkan fungsi dari struktur bangunan yang sedang ditinjau dalam perhitungan analisis statik ekuivalen. Daftar kategori risiko untuk struktur bangunan dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 3.5 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non-gedung untuk
Beban Gempa

Jenis pemanfaatan	Kategori risiko
<p>Gedung dan nongedung 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"> - Fasilitas pertanian, perkebunan, perternakan, dan perikanan - Fasilitas sementara - Gudang penyimpanan - Rumah jaga dan struktur kecil lainnya 	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"> - Perumahan - Rumah toko dan rumah kantor - Pasar - Gedung perkantoran - Gedung apartemen/ rumah susun - Pusat perbelanjaan/ mall - Bangunan industri - Fasilitas manufaktur - Pabrik 	II
<p>Gedung dan nongedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bioskop - Gedung pertemuan - Stadion - Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat - Fasilitas penitipan anak - Penjara - Bangunan untuk orang jompo <p>Gedung dan nongedung, 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"> - Pusat pembangkit listrik biasa - Fasilitas penanganan air - Fasilitas penanganan limbah - Pusat telekomunikasi <p>Gedung dan nongedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.</p>	III
Jenis pemanfaatan	Kategori risiko
<p>Gedung dan nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bangunan-bangunan monumental - Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan - Rumah ibadah - Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat - Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat - Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya - Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat - Pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat - 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 <p>Gedung dan nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.</p>	IV

8. Faktor Keutamaan Gempa (I_e)

Faktor keutamaan gempa (I_e) dapat ditentukan berdasarkan kategori risiko dari struktur bangunan yang sedang ditinjau dalam perhitungan analisis statik ekuivalen.

Tabel 3.6 Faktor Keutamaan Gempa (I_e)

Kategori risiko	Faktor keutamaan gempa, I_e
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,50

9. Kategori Desain Seismik (KDS)

Kategori desain seismik (KDS) dari struktur bangunan dapat ditentukan berdasarkan nilai S_{DS} dan S_{D1} , lalu dipilih kategori desain seismik (KDS) yang lebih kritis.

Tabel 3.7 Kategori Desain Seismik (KDS) Berdasarkan Parameter S_{DS}

Nilai S_{DS}	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{DS} < 0,167$	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

Tabel 3.8 Kategori Desain Seismik (KDS) Berdasarkan Parameter S_{D1}

Nilai S_{D1}	Kategori risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{D1} < 0,067$	A	A
$0,067 \leq S_{D1} < 0,133$	B	C
$0,133 \leq S_{D1} < 0,20$	C	D
$0,20 \leq S_{D1}$	D	D

10. Sistem Struktur dan Parameter Struktur

Menentukan faktor R (koefisien modifikasi respons), C_d (faktor pembesaran simpangan lateral), dan Ω_0 (faktor kuat lebih) berdasarkan sistem struktur.

Tabel 3.9 Faktor R , C_d , dan Ω_0 untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R^a	Faktor kuat lebih sistem, Ω_0^b	Faktor pembesaran defleksi, C_d^c	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, f_x (m) ^d				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D*	E*	F*
A. Sistem dinding penumpu								
1. Dinding geser beton bertulang khusus ^e	5	2½	5	TB	TB	48	48	30
2. Dinding geser beton bertulang biasa ^f	4	2½	4	TB	TB	TI	TI	TI
3. Dinding geser beton polos detail ^g	2	2½	2	TB	TI	TI	TI	TI
4. Dinding geser beton polos biasa ^h	1½	2½	1½	TB	TI	TI	TI	TI
5. Dinding geser pracetak menengah ⁱ	4	2½	4	TB	TB	12'	12'	12'
6. Dinding geser pracetak biasa ^j	3	2½	3	TB	TI	TI	TI	TI
7. Dinding geser batu bata bertulang khusus	5	2½	3½	TB	TB	48	48	30
8. Dinding geser batu bata bertulang menengah	3½	2½	2¼	TB	TB	TI	TI	TI
9. Dinding geser batu bata bertulang biasa	2	2½	1½	TB	48	TI	TI	TI
10. Dinding geser batu bata polos detail	2	2½	1½	TB	TI	TI	TI	TI
11. Dinding geser batu bata polos biasa	1½	2½	1½	TB	TI	TI	TI	TI
12. Dinding geser batu bata prategang	1½	2½	1½	TB	TI	TI	TI	TI
13. Dinding geser batu bata ringan (AAC) bertulang biasa	2	2½	2	TB	10	TI	TI	TI
14. Dinding geser batu bata ringan (AAC) polos biasa	1½	2½	1½	TB	TI	TI	TI	TI
15. Dinding rangka ringan (kayu) dilapisi dengan panel struktur kayu yang ditujukan untuk tahanan geser, atau dengan lembaran baja	5½	3	4	TB	TB	20	20	20
16. Dinding rangka ringan (baja canal dingin) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang ditujukan untuk tahanan geser, atau dengan lembaran baja	5½	3	4	TB	TB	20	20	20
17. Dinding rangka ringan dengan panel geser dari semua material lainnya	2	2½	2	TB	TB	10	TI	TI
18. Batem dinding rangka ringan (baja canal dingin) menggunakan bresing strip datar	4	2	3½	TB	TB	20	20	20
B. Sistem rangka bangunan								
1. Rangka baja dengan bresing eksentris	5	2	4	TB	TB	48	48	30
2. Rangka baja dengan bresing konsentris khusus	5	2	5	TB	TB	48	48	30
3. Rangka baja dengan bresing konsentris biasa	3½	2	3¼	TB	TB	10'	10'	TI'
4. Dinding geser beton bertulang khusus ^e	5	2½	5	TB	TB	48	48	30
5. Dinding geser beton bertulang biasa ^f	5	2½	4½	TB	TB	TI	TI	TI
6. Dinding geser beton polos detail ^g	2	2½	2	TB	TI	TI	TI	TI
7. Dinding geser beton polos biasa ^h	1½	2½	1½	TB	TI	TI	TI	TI
8. Dinding geser pracetak menengah ⁱ	5	2½	4½	TB	TB	12'	12'	12'
9. Dinding geser pracetak biasa ^j	4	2½	4	TB	TI	TI	TI	TI
10. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing eksentris	5	2	4	TB	TB	48	48	30
11. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing konsentris khusus	5	2	4½	TB	TB	48	48	30
12. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing biasa	3	2	3	TB	TB	TI	TI	TI
13. Dinding geser peat baja dan beton komposit	5½	2½	5½	TB	TB	48	48	30
14. Dinding geser baja dan beton komposit khusus	5	2½	5	TB	TB	48	48	30
15. Dinding geser baja dan beton komposit biasa	5	2½	4½	TB	TB	TI	TI	TI
16. Dinding geser batu bata bertulang khusus	5½	2½	4	TB	TB	48	48	30
17. Dinding geser batu bata bertulang menengah	4	2½	4	TB	TB	TI	TI	TI
18. Dinding geser batu bata bertulang biasa	2	2½	2	TB	48	TI	TI	TI

Lanjutan Tabel 3.9

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R^a	Faktor kuat lebih sistem, Ω_0^b	Faktor pembesaran defleksi, C_u^c	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, h_n (m) ^d				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D ^e	E ^e	F ^f
19. Dinding geser batu bata polos didetail	2	2½	2	TB	T1	T1	T1	T1
20. Dinding geser batu bata polos biasa	1½	2½	1½	TB	T1	T1	T1	T1
21. Dinding geser batu bata prategang	1½	2½	1½	TB	T1	T1	T1	T1
22. Dinding rangka ringan (kayu) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang dimaksudkan untuk menahan geser	7	2½	4½	TB	TB	22	22	22
23. Dinding rangka ringan (baja kanal dingin) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang dimaksudkan untuk menahan geser, atau dengan lembaran baja	7	2½	4½	TB	TB	22	22	22
24. Dinding rangka ringan dengan panel geser dari semua material lainnya	2½	2½	2½	TB	TB	10	TB	TB
25. Rangka baja dengan bracing terkekang terhadap tekuk	8	2½	6	TB	TB	48	48	30
26. Dinding geser pelat baja khusus	7	2	6	TB	TB	48	48	30
C. Sistem rangka pemikul momen								
1. Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	5½	TB	TB	48	30	T1
3. Rangka baja pemikul momen menengah	4½	3	4	TB	TB	10 ^g	T1 ^g	T1 ^g
4. Rangka baja pemikul momen biasa	3½	3	3	TB	TB	T1 ^g	T1 ^g	T1 ^g
5. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus ^h	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	6	3	4½	TB	TB	T1	T1	T1
7. Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	T1	T1	T1	T1
8. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
9. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	6	3	4½	TB	TB	T1	T1	T1
10. Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen	6	3	5½	48	48	30	T1	T1
11. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	T1	T1	T1	T1
12. Rangka baja kanal dingin pemikul momen khusus dengan pambautan ⁱ	3½	3 ^g	3½	10	10	10	10	10
D. Sistem ganda dengan rangka pemikul momen khusus yang mampu menahan paling sedikit 25 % gaya seismik yang ditetapkan								
1. Rangka baja dengan bracing eksentris	8	2½	4	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka baja dengan bracing konsentris khusus	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB
3. Dinding geser beton bertulang khusus ^h	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB
4. Dinding geser beton bertulang biasa ^h	6	2½	6	TB	TB	T1	T1	T1
5. Rangka baja dan beton komposit dengan bracing eksentris	8	2½	4	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka baja dan beton komposit dengan bracing konsentris khusus	6	2½	6	TB	TB	TB	TB	TB
7. Dinding geser pelat baja dan beton komposit	7½	2½	6	TB	TB	TB	TB	TB
8. Dinding geser baja dan beton komposit khusus	7	2½	6	TB	TB	TB	TB	TB
9. Dinding geser baja dan beton komposit biasa	6	2½	6	TB	TB	T1	T1	T1
10. Dinding geser batu bata bertulang khusus	5½	3	6	TB	TB	TB	TB	TB
11. Dinding geser batu bata bertulang menengah	4	3	3½	TB	TB	T1	T1	T1
12. Rangka baja dengan bracing terkekang terhadap tekuk	8	2½	6	TB	TB	TB	TB	TB
13. Dinding geser pelat baja khusus	8	2½	6½	TB	TB	TB	TB	TB

Lanjutan Tabel 3.9

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R^a	Faktor kuat lebih sistem, Ω^b	Faktor pembesaran defleksi, C_d^c	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, h_n (m) ^d				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D ^e	E ^e	F ^f
E. Sistem ganda dengan rangka pemikul momen menengah mampu menahan paling sedikit 25 % gaya seismik yang ditetapkan								
1. Rangka baja dengan bresing konsentris khusus ^g	6	2½	5	TB	TB	10	TI	TI
2. Dinding geser beton bertulang khusus ^h	6½	2½	5	TB	TB	48	30	30
3. Dinding geser batu bata bertulang biasa	3	3	2½	TB	48	TI	TI	TI
4. Dinding geser batu bata bertulang menengah	3½	3	3	TB	TB	TI	TI	TI
5. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing konsentris khusus	5½	2½	4½	TB	TB	48	30	TI
6. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing biasa	3½	2½	3	TB	TB	TI	TI	TI
7. Dinding geser baja dan beton komposit biasa	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
8. Dinding geser beton bertulang biasa ^g	5½	2½	4½	TB	TB	TI	TI	TI
F. Sistem interaktif dinding geser-rangka dengan rangka pemikul momen beton bertulang biasa dan dinding geser beton bertulang biasa^g	4½	2½	4	TB	TI	TI	TI	TI
G. Sistem kolom kantilever didetail untuk memenuhi persyaratan untuk :								
1. Sistem kolom baja dengan kantilever khusus	2½	1½	2½	10	10	10	10	10
2. Sistem kolom baja dengan kantilever biasa	1½	1½	1½	10	10	TI ⁱ	TI ⁱ	TI ⁱ
3. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus ^m	2½	1½	2½	10	10	10	10	10
4. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	1½	1½	1½	10	10	TI	TI	TI
5. Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	1	1½	1	10	TI	TI	TI	TI
6. Rangka kayu	1½	1½	1½	10	10	10	TI	TI
H. Sistem baja tidak didetail secara khusus untuk ketahanan seismik, tidak termasuk sistem kolom kantilever	3	3	3	TB	TB	TI	TI	TI

11. Periode Fundamental (T)

Periode fundamental dapat ditentukan berdasarkan parameter periode pendekatan yaitu C_t dan x serta tinggi dari struktur bangunan (h_n).

Tabel 3.10 Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x

Tipe struktur	C_t	x
Sistem rangka pemikul momen di mana rangka pemikul 100 % gaya seismik yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya seismik:		
• 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

Periode fundamental dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$T_a = C_t \cdot h_n^x \quad (3.7)$$

Keterangan:

T_a = Periode fundamental (s)

C_t dan x = Parameter periode pendekatan

h_n = Tinggi dari struktur bangunan (m)

12. Koefisien Respon Seismik (C_s)

Koefisien respon seismik dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$C_s = \frac{SDS}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3.8)$$

Nilai C_s tidak perlu melebihi:

Untuk $T \leq T_L$

$$C_s = \frac{SD1}{T \cdot \left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3.9)$$

Untuk $T > T_L$

$$C_s = \frac{SD1 \cdot T_L}{T^2 \cdot \left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3.10)$$

Nilai C_s harus lebih besar dari:

$$C_s = 0,044 \cdot SDS \cdot I_e \geq 0,01 \quad (3.11)$$

Untuk struktur yang berlokasi di daerah di mana $S_1 \geq 0,6$ g, maka C_s harus lebih besar dari:

$$C_s = \frac{0,5 \cdot S_1}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (3.12)$$

13. Berat Seismik Efektif Bangunan

Berat seismik efektif bangunan terdiri dari berat sendiri struktur, beban mati tambahan (*additional dead load / super dead load*), dan beban hidup tereduksi. Perhitungan berat seismik efektif bangunan dilakukan pada masing-masing tingkatan lantai. Berat seismik efektif bangunan pada masing-masing tingkatan lantai akan digunakan untuk perhitungan beban gempa nominal statik ekuivalen pada masing-masing tingkatan lantai dari struktur bangunan.

14. Gaya Geser Gempa Dasar (*Base Shear Force*)

Gaya geser gempa dasar dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$V = C_s \cdot W_{\text{total}} \quad (3.13)$$

Keterangan:

V = Gaya geser gempa dasar (kN)

C_s = Koefisien respons seismik (g)

W_{total} = Berat seismik efektif bangunan total (kN)

15. Distribusi Gaya Geser Gempa

Setelah mengetahui nilai gaya geser gempa dasar, selanjutnya gaya geser gempa tersebut didistribusikan pada masing-masing tingkatan lantai dari struktur bangunan. Gaya geser gempa pada masing-masing tingkatan lantai dari struktur bangunan dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$F_x = C_{vx} \cdot V \text{ di mana } C_{vx} = \frac{W_x \cdot h_x^k}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot h_i^k} \quad (3.14)$$

Keterangan:

F_x = Gaya geser gempa pada masing-masing tingkatan lantai (kN)

C_{vx} = Faktor distribusi vertikal

V = Gaya geser gempa dasar (kN)

W_x dan W_i = Bagian berat seismik efektif bangunan total (W_{total}) yang ditempatkan atau dikenakan pada tingkat x atau i (kN)

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

k = Eksponen yang terkait dengan periode struktur bangunan dengan nilai sebagai berikut:

untuk struktur dengan $T \leq 0,5$ detik, $k = 1$

untuk struktur dengan $T \geq 2,5$ detik, $k = 2$

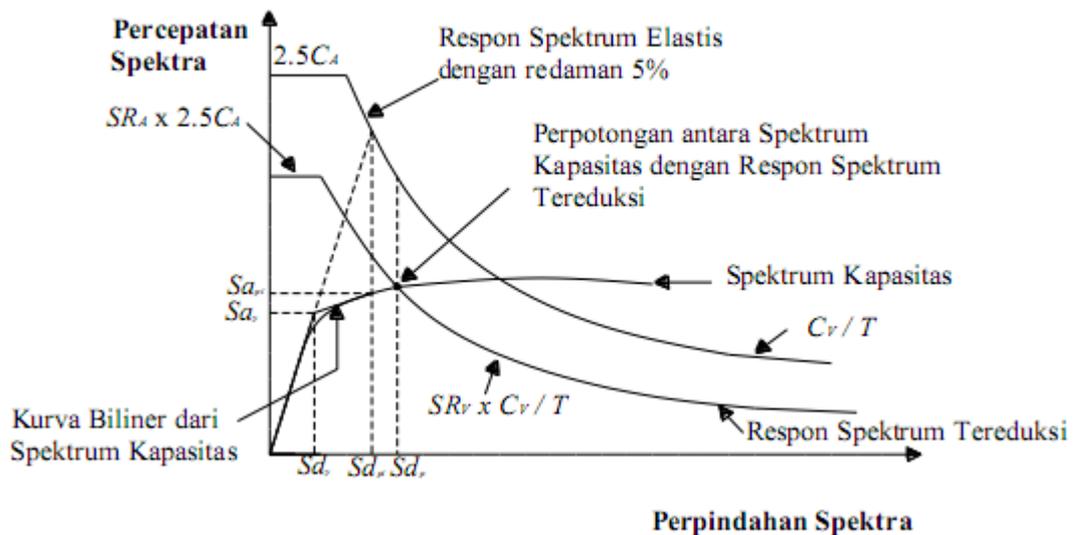
untuk struktur dengan $0,5 < T < 2,5$ detik, $k = 2$ atau ditentukan dengan interpolasi linier antara nilai 1 dan 2

3.3 Kinerja Struktur Bangunan

Konsep perencanaan struktur bangunan tahan gempa berbasis kinerja atau yang dikenal dengan *Performance Based Earthquake Engineering* (PBEE) dapat digunakan untuk mendesain struktur bangunan baru (*Performance Based Seismic Design*) maupun untuk mengevaluasi struktur bangunan yang sudah ada (*Performance Based Seismic Evaluation*). Konsep perencanaan struktur bangunan tahan gempa berbasis kinerja didefinisikan sebagai strategi dalam perencanaan, pembangunan, dan perawatan struktur bangunan agar dapat memiliki kinerja yang diharapkan pada suatu kondisi gempa yang telah ditetapkan. Tingkatan kinerja struktur bangunan dapat diketahui dengan melihat kerusakan yang terjadi pada struktur bangunan dan dampak perbaikan yang diperlukan saat struktur bangunan terkena beban gempa rencana dengan periode ulang tertentu. Konsep perencanaan struktur bangunan tahan gempa berbasis kinerja memiliki dua elemen utama yaitu kapasitas struktur bangunan (*capacity*) dan beban yang ditahan oleh struktur bangunan (*demand*). Kapasitas struktur bangunan adalah kemampuan dari struktur bangunan untuk menanggulangi beban gempa tanpa mengalami kerusakan yang berarti, sedangkan beban (*demand*) adalah representasi dari gerakan tanah akibat gempa bumi yang akan digambarkan sebagai kurva respon spektrum.

Proses evaluasi kinerja struktur bangunan dimulai dengan membuat model struktur bangunan kemudian melakukan simulasi kinerjanya terhadap beban gempa rencana yang telah ditentukan. Simulasi kinerja akan memberikan informasi tentang tingkat kerusakan (*level of damage*) yang terjadi pada struktur bangunan ketika terkena beban gempa rencana. Hal penting yang perlu diperhatikan dalam mengevaluasi kinerja struktur bangunan adalah penentuan titik kinerja (*performance point*) yang merupakan estimasi di mana kapasitas struktur bangunan (*capacity*) mampu menahan beban (*demand*) yang diberikan pada struktur bangunan. Dari titik kinerja (*performance point*) tersebut dapat diketahui tingkat kerusakan struktur (*level of damage*) berdasarkan perpindahan lateral (*drift*) yang terjadi. Informasi tentang tingkat kerusakan yang terjadi pada struktur bangunan tentunya merupakan sebuah perkiraan, namun demikian informasi tersebut dapat membantu dalam pengambilan keputusan terkait hal apa yang seharusnya dilakukan terhadap hasil analisis dari struktur bangunan tersebut.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menentukan titik kinerja (*performance point*) adalah metode spektrum kapasitas (*capacity spectrum method*) yang mengacu pada ATC-40. Dalam metode spektrum kapasitas, proses dimulai dengan menentukan kurva kapasitas (*capacity curve*) yang menggambarkan hubungan antara perpindahan (*displacement*) dan gaya geser dasar (*base shear force*) yang kemudian dikonversi ke dalam format ADRS (*Acceleration Displacement Response Spectrum*). Format ADRS adalah gabungan antara perpindahan (*displacement*) dan percepatan (*acceleration*) respon spektrum di mana absis (sumbu x) merupakan perpindahan (S_d) dan ordinat (sumbu y) merupakan percepatan (S_a). ATC-40 menetapkan batas redaman ekuivalen untuk mengantisipasi terjadinya penurunan kekuatan dan kekakuan struktur secara bertahap. Respon spektrum dalam format ADRS ini kemudian dimodifikasi dengan memasukkan pengaruh redaman efektif (*effective damping*) yang terjadi akibat terbentuknya sendi plastis. Spektrum tersebut disebut sebagai *demand spectrum*.



Gambar 3.3 Penentuan Titik Kinerja Menurut Metode Spektrum Kapasitas

Metode spektrum kapasitas menyajikan tiga buah grafik yaitu spektrum kapasitas (*capacity spectrum*), respon spektrum, dan *demand spectrum* dalam format ADRS. Untuk mengetahui perilaku struktur bangunan yang ditinjau terhadap beban gempa rencana yang diberikan, kurva kapasitas (*capacity curve*) kemudian dibandingkan dengan kurva *demand* yang berupa respon spektrum. Titik kinerja diperoleh melalui titik perpotongan antara spektrum kapasitas (*capacity spectrum*) dan *demand spectrum*. Metode spektrum kapasitas secara khusus telah *built-in* dalam *software* SAP 2000. Proses konversi kurva kapasitas (*capacity curve*) dan kurva respon spektrum ke dalam format ADRS dikerjakan secara otomatis di dalam *software* SAP 2000. Parameter yang perlu dimasukkan ke dalam *software* SAP 2000 untuk menggunakan metode spektrum kapasitas adalah nilai C_a dan C_v . C_a adalah koefisien percepatan muka tanah puncak atau biasa disebut dengan *Peak Ground Acceleration* (PGA), sedangkan C_v adalah koefisien percepatan spektral desain untuk periode 1 detik. Pada metode spektrum kapasitas terdapat tiga kondisi bangunan, yaitu tipe A, B, dan C. Batasan-batasan dari ketiga kondisi bangunan tersebut akan dijabarkan dalam tabel di bawah ini.

Tabel 3.11 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>

Setelah mendapatkan titik kinerja (*performance point*), selanjutnya dapat ditentukan tingkat kinerja (*performance level*) dari struktur bangunan yang ditinjau. Tingkat kinerja (*performance level*) dari suatu struktur bangunan ditentukan berdasarkan batasan simpangan maksimum yang terjadi pada struktur bangunan tersebut setelah diberi beban gempa rencana. Menurut ATC-40, terdapat enam tingkatan kinerja untuk struktur bangunan. Tingkatan-tingkatan kinerja struktur bangunan tersebut di antaranya adalah:

1. *Immediate Occupancy*

Kondisi di mana bila terjadi gempa bumi, hanya sedikit kerusakan struktural yang terjadi pada struktur bangunan. Karakteristik dan kapasitas sistem penahan gaya vertikal dan lateral pada struktur bangunan masih sama dengan kondisi saat gempa bumi belum terjadi, sehingga struktur bangunan masih aman dan dapat langsung digunakan kembali.

2. *Damage Control*

Kondisi di mana tingkat kerusakan struktural yang terjadi pada bangunan berada di antara level IO dan LS. Level ini memiliki kemampuan yang lebih baik dalam membatasi kerusakan struktural dibandingkan dengan level LS.

3. *Life Safety*

Kondisi di mana bila terjadi gempa bumi, timbul kerusakan yang cukup signifikan pada struktur bangunan, akan tetapi struktur bangunan masih dapat menahan beban gempa. Komponen-komponen struktur utama tidak runtuh. Perlu dilakukan perbaikan terhadap kerusakan-kerusakan yang terjadi sebelum struktur bangunan dapat digunakan kembali.

4. *Limited Safety*

Kondisi struktur bangunan tidak sebaik level *life safety* dan tidak seburuk level *structural stability*, termasuk ketika level *life safety* tidak efektif atau ketika hanya beberapa kerusakan struktur kritis yang dapat dikurangi.

5. *Structural Stability*

Tingkatan ini merupakan batas di mana struktur bangunan sudah mengalami kerusakan yang parah. Timbul kerusakan pada komponen struktural maupun non-struktural. Struktur bangunan tidak lagi mampu menahan gaya lateral karena terjadinya penurunan, namun struktur bangunan belum mengalami keruntuhan.

6. *Not Considered*

Pada tingkatan ini, struktur bangunan sudah mengalami keruntuhan sehingga hanya dapat dilakukan evaluasi seismik dan struktur bangunan tidak dapat digunakan kembali.

ATC-40 juga memberikan batasan simpangan maksimum yang diizinkan untuk masing-masing tingkatan kinerja dari struktur bangunan. Batasan ini dapat digunakan untuk mengevaluasi dan menentukan tingkat kinerja dari struktur bangunan yang ditinjau. Batasan simpangan maksimum yang diizinkan untuk masing-masing tingkatan kinerja akan dijabarkan dalam tabel di bawah ini.

Tabel 3.12 Batasan Simpangan Maksimum Menurut ATC-40

Parameter	Level Performa 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
Simpangan Inelastis Maksimum	0,005	0,005 – 0,015	Tidak dibatasi	Tidak dibatasi

3.4 Analisis *Pushover*

Menurut ATC-40, analisis *pushover* adalah salah satu komponen *performance based design* yang menjadi sarana dalam menentukan kapasitas dan performa dari suatu struktur bangunan. Dalam penggunaan analisis *pushover*, pengaruh beban gempa rencana terhadap struktur bangunan dianggap sebagai beban-beban statik dalam arah lateral yang nilainya ditingkatkan secara bertahap sampai struktur bangunan tersebut mencapai target perpindahan (*displacement*) tertentu atau mencapai pola keruntuhan tertentu. Dari hasil analisis *pushover* tersebut didapatkan nilai gaya geser dasar (*base shear force*) dan nilai perpindahan (*displacement*) yang terjadi pada titik kontrol untuk setiap tahap pembebanan. Nilai-nilai yang didapatkan dari hasil analisis *pushover* tersebut kemudian dipetakan menjadi sebuah kurva yang disebut sebagai kurva kapasitas (*capacity curve*) dari struktur bangunan. Selain itu, analisis *pushover* juga dapat menunjukkan secara visual perilaku struktur bangunan pada kondisi elastis, plastis, hingga terjadinya keruntuhan pada elemen-elemen struktur yang terdapat pada struktur bangunan. Prosedur analisisnya akan menjelaskan bagaimana mengidentifikasi elemen-elemen dari struktur bangunan yang akan mengalami kegagalan terlebih dahulu yang ditandai dengan terbentuknya sendi plastis. Seiring dengan penambahan beban akan ada elemen-elemen struktur lain yang

mengalami kelelahan dan mengalami deformasi plastis. Dengan menampilkan secara visual elemen-elemen struktur yang berpotensi mengalami kegagalan, dapat dilakukan upaya pencegahan dengan melakukan pendetailan khusus pada elemen-elemen struktur tersebut.

Analisis *pushover* dapat digunakan sebagai alat bantu dalam perencanaan struktur bangunan tahan gempa, asalkan menyesuaikan dengan keterbatasan yang ada yaitu:

1. Hasil dari analisis *pushover* masih berupa suatu pendekatan, karena bagaimanapun perilaku gempa bumi yang sebenarnya adalah bersifat bolak-balik melalui siklus tertentu, sedangkan pembebanan pada analisis *pushover* bersifat statik monotonik.
2. Pemilihan pola pembebanan lateral yang digunakan dalam analisis *pushover* adalah sangat penting.
3. Untuk membuat model analisis non-linier akan lebih rumit dibandingkan dengan analisis linier. Analisis non-linier harus memperhitungkan karakteristik inelastik dari elemen-elemen struktur yang penting.

Karena yang dievaluasi adalah elemen-elemen struktur yang jumlahnya relatif banyak, maka dari itu proses analisis *pushover* sepenuhnya harus dikerjakan dengan menggunakan bantuan *software* komputer seperti program SAP 2000. Tahapan utama dalam melakukan analisis *pushover* adalah sebagai berikut:

1. Pembuatan model struktur bangunan yang akan dianalisis secara dua atau tiga dimensi.
2. Penginputan beban gravitasi dan beban gempa rencana yang bekerja pada struktur bangunan yang telah dimodelkan.
3. Pemodelan sendi plastis pada elemen-elemen balok dan kolom yang terdapat pada struktur bangunan.

4. Penentuan titik kontrol untuk mengamati besarnya perpindahan (*displacement*) yang terjadi pada struktur bangunan. Umumnya digunakan titik yang berada di atap bangunan sebagai titik kontrol dalam analisis *pushover*. Rekaman besarnya perpindahan (*displacement*) pada titik kontrol dan besarnya gaya geser dasar (*base shear force*) akan digunakan untuk membuat kurva kapasitas (*capacity curve*).
5. Analisis *pushover* dilakukan setelah struktur bangunan dibebani oleh beban gravitasi yang direncanakan. Jadi setelah struktur bangunan dibebani oleh beban gravitasi, beban statik arah lateral diberikan secara bertahap untuk mencapai target perpindahan tertentu.
6. Pembuatan kurva kapasitas (*capacity curve*) yang menggambarkan hubungan antara perpindahan (*displacement*) dan gaya geser dasar (*base shear force*).
7. Penentuan titik kinerja (*performance point*) dari struktur bangunan yang ditinjau.
8. Penentuan level kinerja (*performance level*) dari struktur bangunan yang ditinjau berdasarkan simpangan yang terjadi pada saat titik kontrol tepat berada pada titik kinerja (*performance point*) atau pada saat target perpindahan telah tercapai.

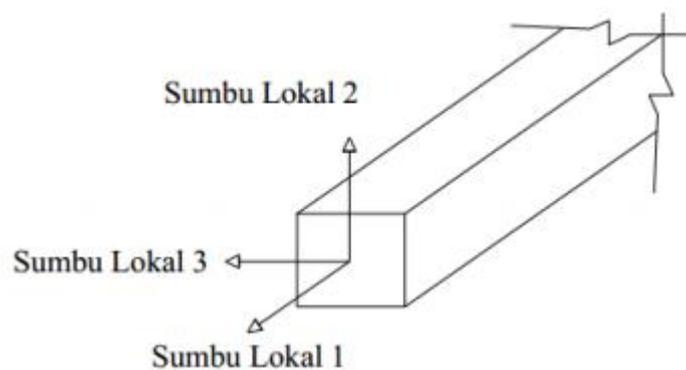
3.5 Sendi Plastis

Pada saat struktur bangunan menerima beban gempa pada tingkatan atau kondisi tertentu, maka akan terbentuk sendi plastis (*hinge*) pada elemen-elemen struktur yang terdapat pada struktur bangunan tersebut. Sendi plastis merupakan indikator ketidakmampuan elemen struktur (balok dan kolom) dalam menahan gaya dalam yang terjadi (Afandi, 2010). Perencanaan suatu struktur bangunan harus sesuai dengan konsep *strong column weak beam* agar apabila terjadi suatu keruntuhan struktur, maka yang runtuh terlebih dahulu adalah elemen balok. Apabila elemen kolom yang runtuh terlebih dahulu, maka struktur bangunan akan langsung runtuh dan hancur. Dengan memodelkan sendi plastis pada elemen-

elemen struktur, maka dapat diketahui pola keruntuhan yang terjadi pada struktur bangunan yang ditinjau. Sendi plastis dimodelkan pada setiap elemen balok dan kolom yang terdapat pada struktur bangunan. Terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam memodelkan sendi plastis pada elemen-elemen struktur di antaranya adalah:

1. Sendi plastis pada elemen balok

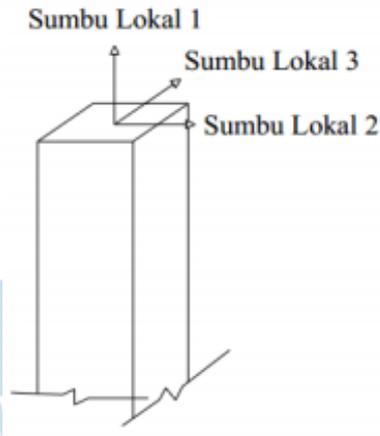
Sendi plastis (*hinge properties*) pada elemen balok adalah momen M_3 , yang berarti sendi plastis pada elemen balok hanya terjadi akibat momen searah sumbu lokal 3. Posisi sumbu lokal 3 pada elemen balok dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 3.4 Posisi Sumbu Lokal Elemen Balok

2. Sendi plastis pada elemen kolom

Sendi plastis (*hinge properties*) pada elemen kolom adalah $P-M_2-M_3$, yang berarti sendi plastis pada elemen kolom terjadi akibat interaksi gaya aksial (P) dan momen (M) pada arah sumbu lokal 2 dan sumbu lokal 3. Posisi sumbu lokal 2 dan sumbu lokal 3 pada elemen kolom dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 3.5 Posisi Sumbu Lokal Elemen Kolom

3. Penentuan letak sendi plastis

Setelah pendefinisian data sendi plastis (*hinge properties*) pada elemen balok dan kolom, langkah selanjutnya adalah menentukan letak terjadinya sendi plastis pada elemen balok dan kolom. Letak sendi plastis pada analisis *pushover* dengan bantuan program SAP 2000 hanya dapat dinyatakan sebagai panjang relatif 0 dan 1. Pada elemen balok, posisi 0 menyatakan posisi awal dari panjang bersih elemen balok, sedangkan posisi 1 menyatakan posisi akhir dari panjang bersih elemen balok. Kedua posisi tersebut terletak pada muka kolom. Pada elemen kolom, posisi 0 menyatakan posisi awal dari panjang bersih elemen kolom, sedangkan posisi 1 menyatakan posisi akhir dari panjang bersih elemen kolom. Kedua posisi tersebut terletak pada tepi muka balok.