

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Pada saat ini pembangunan gedung bertingkat menjadi prioritas utama bagi kalangan pemerintah maupun swasta. Hal ini erat kaitannya dengan keterbatasan lahan yang tersedia terutama di kota-kota besar sebagai dampak dari pesatnya pertumbuhan penduduk yang terjadi. Seiring bertambahnya kepadatan penduduk yang terjadi dan keterbatasan lahan maka dibangunlah bangunan gedung bertingkat yang bervariasi, salah satu bangunan yang sedang banyak di renovasi saat ini adalah gedung pasar yang lantai dasarnya dijadikan *basement*. Pada penelitian ini akan membandingkan perilaku struktur *basement* yang terkekang dan tidak terkekang (Tohho,dkk,2024). Pada pembangunan gedung bertingkat harus ditinjau dari beberapa sisi antara lain peninjauan kelayakan konstruksi gedung tersebut, dalam hubungannya sesuai dengan kemampuan gedung mampu bertahan pada level kinerja tertentu. Sehingga material atau bahan yang digunakan dalam bangunan harus kuat dan tahan lama salah satunya adalah beton. Selain itu tinggi bangunan tersebut mempengaruhi simpangan yang terjadi pada setiap element struktur, terutama akibat beban gempa yang diterima oleh bangunan tersebut.

Mengingat Indonesia merupakan negara kepulauan yang terletak pada pertemuan 3 (tiga) lempeng tektonik dunia, yaitu lempeng Euro-Asia di bagian Utara, lempeng Indo-Australia di bagian Selatan, dan lempeng Samudera Pasifik di bagian Timur. Penunjaman (subduksi) lempeng Indo-Australia yang bergerak relatif ke Utara dengan lempeng Euro-Asia yang bergerak ke Selatan mengakibatkan jalur gempa bumi dan rangkaian gunung api aktif sepanjang Pulau

Sumatera, Pulau Jawa, Bali, dan Nusa Tenggara sejajar dengan jalur penunjaman kedua lempeng (Khrisna, 2008). Maka aturan perencanaan untuk mendirikan bangunan adalah bangunan tersebut harus mampu menahan beban gempa yang ada, tidak terjadi kerusakan berat pada struktur jika terkena beban gempa, karena pada dasarnya prinsip bangunan tahan gempa adalah boleh terjadi kerusakan pada bangunan tersebut, tetapi tidak pada elemen struktur, atau paling tidak kerusakan atau keruntuhan bangunan tersebut diperlambat agar para penghuni didalamnya mempunyai waktu untuk mengevakuasi diri dan dapat menjaga keamanan jiwa. Untuk itu diperlukan *assessment* terhadap suatu bangunan konstruksi yang telah ada, agar dapat dievaluasi kerentanannya sehingga dapat diketahui apakah bangunan tersebut masih layak digunakan dan mampu menahan gaya gempa yang mungkin akan terjadi. Suatu struktur dikatakan memenuhi persyaratan kinerja yang baik apabila struktur tersebut memiliki kapasitas untuk menahan gaya gempa sedemikian hingga perilakunya sesuai dengan kriteria perencanaan yang telah ada.

Adapun penelitian sebelumnya yang menjelaskan tentang perbandingan hasil analisis kinerja dan perilaku pada empat model struktur gedung yang berbeda (Tubuh, 2014). Penelitian ini mengambil studi kasus di gedung B pasar Sukawati Gianyar dengan tinggi bangunan dari basement yang berada didalam tanah setinggi 14,90 meter dengan jumlah tingkat yaitu 4 lantai. Pemilihan gedung ini untuk penelitian agar dapat mengetahui apakah gedung ini dapat menahan beban gempa, evaluasi struktur bangunan ini sangat penting dilakukan untuk memastikan level kinerja gedung pada saat terjadinya gempa. Penelitian ini membandingkan 3 jenis struktur dengan kondisi pengekangan yang berbeda yaitu model 1 (M1) dengan lantai basement yang tidak terkekang secara lateral oleh tanah, seperti gedung pada

umunya yang berada di atas tanah, model 2 (M2) dengan perlakuan lantai basement yang terkekang oleh tanah setinggi balok lantai dasar, posisi gedung yang ruangnya bawahnya berada 3,3 m di bawah tanah. Model 3 (M3) dengan lantai basement yang terkekang oleh tanah setinggi 4,6 m, sama seperti gedung M2 tetapi ruangnya bawahnya berada 4,6 m di dalam tanah dan berada pada tengah-tengah kolom.

### 1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, adapun rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana hasil analisis perilaku struktur gedung B Pasar Sukawati yang terkekang dan tidak terkekang secara lateral oleh tanah?
2. Bagaimana hasil analisis kinerja struktur gedung B Pasar Sukawati yang terkekang dan tidak terkekang secara lateral menggunakan analisis *Pushover*?

### 1.3. Tujuan

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini yaitu:

1. Untuk mengetahui hasil analisis perilaku struktur gedung B Pasar Sukawati yang terkekang dan tidak terkekang secara lateral.
2. Untuk mengetahui hasil analisis kinerja struktur gedung B Pasar Sukawati yang terkekang dan tidak terkekang secara lateral menggunakan analisis *Pushover*.

### 1.4. Manfaat

Manfaat teoritis dalam penulisan proposal ini adalah dapat memberikan kontribusi terhadap ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang Teknik Sipil, mengembangkan pengetahuan mengenai penggunaan *software* SAP2000.

Proposal ini diharapkan dapat memberikan informasi akan level kinerja dari struktur gedung yang ditinjau, dimana nantinya akan bermanfaat sebagai pedoman dalam merencanakan struktur bangunan gedung.

### **1.5. Batasan Masalah dan Ruang Lingkup Penelitian**

Penelitian ini hanya menganalisis perilaku dan kinerja struktur gedung beton bertulang yang meliputi balok, kolom dan pelat. Adapun batasan-batasan dalam penelitian ini adalah:

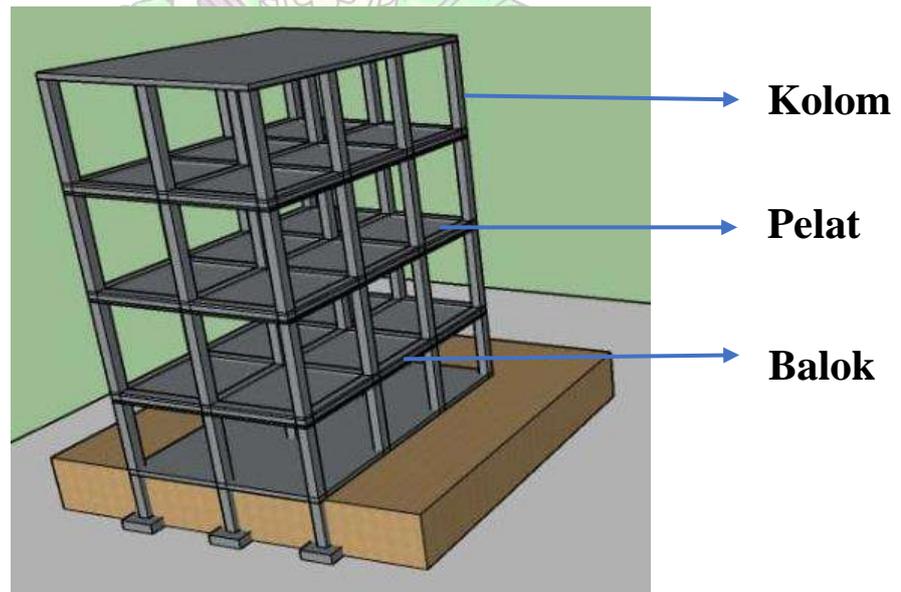
- a. Bangunan terletak pada kondisi tanah sedang (D)
- b. Kontribusi kekakuan dinding pada struktur diabaikan sehingga dinding pengisi keberadaannya dianggap sebagai beban merata.
- c. Perilaku yang basementnya menerima tekanan tanah akan dipasang roll di bagian yang tertutup dengan tanah .
- d. Tidak memperhitungkan interaksi struktur dengan tanah (hubungan struktur dengan tanah diasumsikan dengan perletakan roll).
- e. Tidak dilakukan perhitungan tangga.
- f. Tekanan tanah diabaikan
- g. Dinding beton tidak diperhitungkan

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Desain Elemen Struktur

Sistem struktur kerangka terdiri dari rangkaian elemen struktur. Elemen konstruksi beton bertulang terdiri dari elemen struktur kaku horizontal dan ditumpu dengan elemen kaku vertikal. Elemen-elemen tersebut akan membentuk sebuah sistem struktur portal. Setiap suatu sistem struktur, elemen-elemen penyusunnya mempunyai suatu mekanisme penyaluran beban dari atas ke sistem pondasi (Nasution, 2009). Pada perencanaan struktur gedung digunakan kolom dan balok sebagai elemen-elemen primer struktur. Balok merupakan struktur yang berfungsi memikul beban yang diterima oleh pelat dan meneruskan ke kolom yang di bebani secara aksial oleh balok dan menransfer beban tersebut ke pondasi dan tanah.

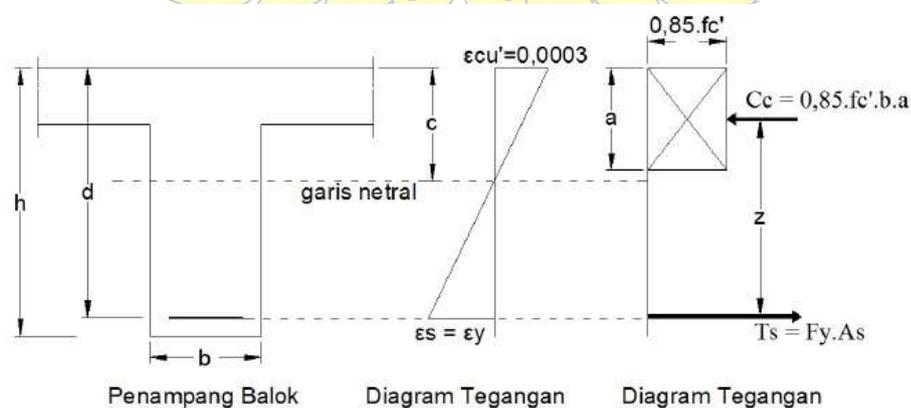


Gambar 2. 1 Struktur Rangka Gedung

### 2.1.1 Balok

Balok adalah elemen struktural yang menerima gaya-gaya yang bekerja dalam arah transversal terhadap sumbunya yang mengakibatkan terjadinya momen lentur dan gaya geser sepanjang bentangnya (Dipohusodo, 1994). Balok merupakan elemen struktural yang menyalurkan beban-beban dari pelat lantai ke kolom sebagai penyangga vertikal. Pada umumnya balok dicor secara monolit dengan pelat dan secara struktural dipasang tulangan dibagian bawah atau dibagian atas dan bawah. Dua hal utama yang dialami oleh balok ialah tekan dan tarik, yang antara lain karena adanya pengaruh lentur ataupun gaya lateral (Wahyudi, dkk, 1999).

Menurut Nawy (1990), apabila beban pada balok bertambah, maka akan terjadi deformasi dan regangan tambahan yang mengakibatkan timbulnya (bertambahnya retak) lentur disepanjang bentang balok. Bila bebannya semakin bertambah, pada akhirnya dapat terjadi keruntuhan elemen struktur, yaitu pada saat beban luarnya mencapai kapasitas elemen. Taraf pembebanan demikian disebut keadaan limit dari keruntuhan pada lentur. Berikut merupakan cara perhitungan kekuatan nominal balok dari balok beton bertulang



Gambar 2. 2 Diagram tegangan regangan beton bertulang  
Sumber : (Nasution , 2009)

Diagram tegangan diatas akan digunakan untuk menentukan momen nominal dari balok beton bertulang. Momen nominal dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$Mn = Cc.z \text{ atau } Mn = Ts.z \dots\dots\dots (2.1)$$

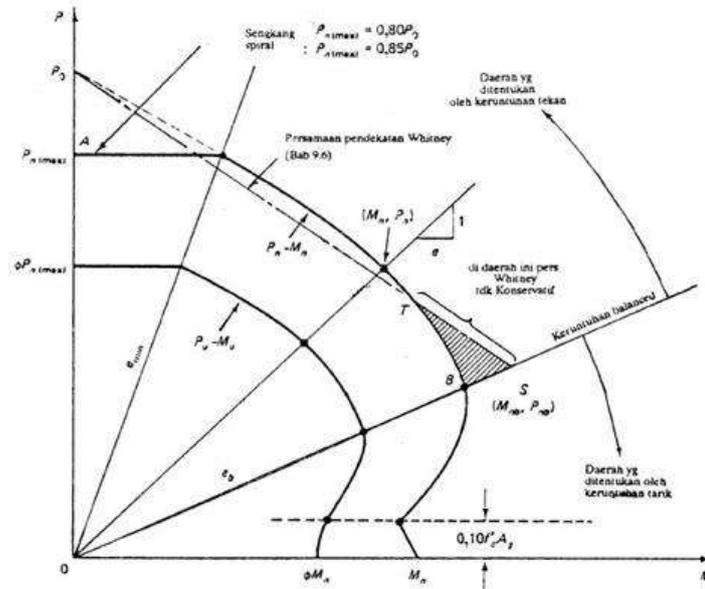
Dari rumus diatas dapat disimpulkan bahwa untuk mendapatkan momen nominal yang besar diperlukan z atau ketinggian balok harus tinggi. Semakin tinggi h balok, maka momen nominal akan semakin tinggi.

### 2.1.2 Kolom

Kolom adalah komponen struktur bangunan yang tugas utamanya adalah menyangga beban aksial tekan vertikal dengan bagian tinggi yang tidak ditopang paling tidak tiga kali dimensi lateral kecil. Apabila terjadi kegagalan pada kolom maka dapat berakibat keruntuhan komponen struktur yang lain yang berhubungan dengannya atau bahkan terjadi keruntuhan total pada keseluruhan struktur bangunan (Dipohusodo, 1994). Fungsi kolom didalam konstruksi adalah menahan beban dari balok. Kolom akan mendistribusikan beban-beban dari atas ke bawah untuk didistribusikan ke pondasi. Kolom menerima beban aksial tekan dan torsi akibat dari beban di atasnya yaitu beban pada balok dan pelat. Momen torsi yang disalurkan dapat berupa momen uniaksial (1 sumbu) ataupun biaksial (2 sumbu).

Kapasitas penampang beton bertulang untuk menahan kombinasi gaya aksial dan momen lentur dapat digambarkan dalam bentuk suatu kurva interaksi antara kedua gaya dalam tersebut. Gambar 2.3 memperlihatkan contoh diagram tersebut. Setiap titik dalam kurva ini menunjukkan kombinasi kekuatan gaya nominal  $P_n$  dan kekuatan momen nominal  $M_n$  yang sesuai dengan lokasi sumbu netralnya. Diagram interaksi tersebut dapat dibagi menjadi dua daerah, yaitu daerah yang ditentukan oleh keruntuhan tarik dan daerah yang ditentukan oleh keruntuhan tekan, dengan

pembatasnya adalah titik balanced (titik B). contoh berikut ini mengilustrasikan pembuatan diagram P-M untuk penampang segiempat tipikal. (Nawy,1998)



Gambar 2. 3 Diagram interaksi P-M kolom  
Sumber: (Nawy, 1998)

Analisis kolom dengan diagram P-M diperhitungkan pada tiga kondisi yaitu :

1. Pada Kondisi Eksentrisitas Kecil

Prinsip-prinsip pada kondisi ini dimana kuat tekan rencana memiliki nilai sebesar kuat rencana maksimum.

$$\phi P_n = \phi P_n \max = 0,80 \phi (A_g - A_{st}) 0,85 f'_c + A_{st} f_y \dots \dots \dots (2.2)$$

2. Pada Kondisi Momen Murni

Momen murni tercapai apabila tulangan tarik belum luluh sedangkan tulangan tekan telah luluh dimana  $f_s$  adalah tegangan tulangan tekan pada kondisi luluh.

Pada kondisi momen murni keruntuhan terjadi saat hancurnya beton ( $P_n = P_u =$

0). Keseimbangan pada kondisi momen murni yaitu :

$$N_{D1} + N_{D2} = N_T \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana :

$$N_{D1} = 0,85 f'c b a \dots\dots\dots (2.4)$$

$$N_{D2} = f's A'_s \dots\dots\dots (2.5)$$

$$N_T = f_y A_s \dots\dots\dots (2.6)$$

Selisih akibat perhitungan sangat kecil sehingga dapat diabaikan. Persamaan yang diperoleh dari segitiga sebangun dengan tinggi sumbu netral pada  $c$  yaitu:

$$f'_s = E_s \epsilon'_s = \frac{E_s 0,003(c-d')}{c} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan-persamaan di atas akan dihasilkan persamaan pangkat dua dengan perubah tinggi sumbu netral  $c$ . Momen rencana dapat dihitung sebagai berikut :

$$M_r = \phi M_n \dots\dots\dots (2.8)$$

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} = N_{D1} Z_1 + N_{D2} Z_2 \dots\dots\dots (2.9)$$

### 3. Pada Kondisi *Balance*

Kondisi keruntuhan *balance* tercapai apabila tulangan tarik luluh dan beton mengalami batas regangan dan mulai hancur. Persamaan yang diperoleh dari segitiga yang sebangun dengan persamaan sumbu netral pada kondisi *balance* ( $C_b$ ) yaitu :

$$\frac{C_b}{d} = \frac{0,003}{0,003 + \frac{f_y}{E_s}} \dots\dots\dots (2.10)$$

atau dengan  $E_s = 200000$ , maka :

$$C_b = \frac{600 d}{600 d + f_y} \dots\dots\dots (2.11)$$

Persamaan kesetimbangan pada kondisi *balance* :

$$P_b = N_{D1} + N_{D2} - N_T \dots\dots\dots (2.12)$$

Sehingga eksentrisitas *balance* ( $e_b$ ) dapat ditulis sebagai berikut :

$$P_b (e_b + d/2) = M_{nb} \dots\dots\dots (2.13)$$

$$M_{rb} = \phi P_b e_b \dots\dots\dots (2.14)$$

### 2.1.3 Pelat

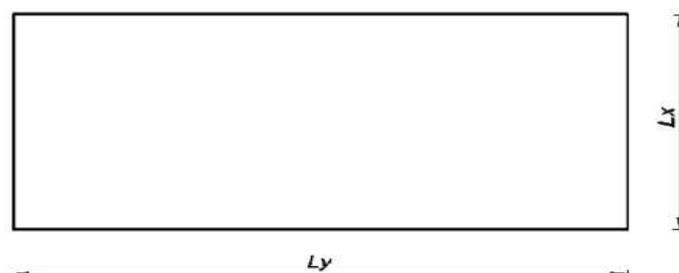
Pelat merupakan elemen struktur lantai di mana beban layan bekerja. Pelat adalah elemen struktur yang akan dikenai beban layan pertama kali sebelum terdistribusi ke elemen struktur yang lain. Elemen pelat mempunyai fungsi sebagai penopang langsung beban atau tumpuan beban (Nasution, 2009). Pelat akan memikul beban sebagai beban lentur dan akan meneruskannya ke tumpuan.

Wang, C.K, dan Salmon, C.G, (1979), berdasarkan perbandingan antara panjang dan lebar, pelat dapat di klasifikasikan menjadi dua macam. Pelat satu arah jika perbandingannya lebih besar atau sama dengan 2. Pelat dua arah jika perbandingan lebih kecil dari pada 2.

#### 1. Pelat Satu Arah (*One Way Slab*)

Pelat satu arah adalah pelat yang ditumpu hanya pada kedua sisinya yang berlawanan saja dan beban-beban ditahan oleh pelat dalam arah yang tegak lurus terhadap balok-balok penunjang (Dipohusodo, 1994).

Suatu pelat dikatakan pelat satu arah apabila  $\frac{L_y}{L_x} \geq 2$ , dimana  $L_y$  dan  $L_x$  adalah panjang dari sisi-sisinya seperti pada Gambar 2.4



Gambar 2. 4 Pelat satu arah

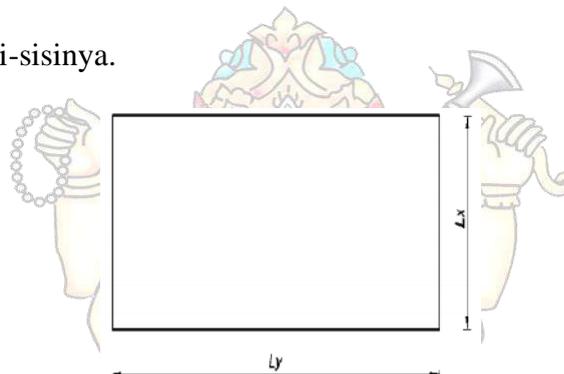
Keterangan:

$L_y$  ,  $L_x$  = panjang dari sisi-sisinya

## 2. Pelat Satu Arah (*Two Way Slab*)

Pelat dua arah adalah pelat yang ditumpu oleh balok pada keempat sisinya dan beban-beban ditahan oleh pelat dalam arah yang tegak lurus terhadap balok-balok penunjang. (Dipohusodo, 1994).

Suatu pelat dikatakan pelat dua arah apabila  $\frac{L_y}{L_x} \leq 2$ , dimana  $L_y$  dan  $L_x$  adalah panjang dari sisi-sisinya.



Gambar 2. 5 Pelat dua arah

Keterangan:

$L_y$  ,  $L_x$  = panjang dari sisi-sisinya

### 2.1.4 Interaksi Struktur Tanah

Interaksi struktur tanah adalah proses di mana deformasi struktur mempengaruhi respon tanah, dan respon tanah mempengaruhi deformasi struktur. Analisis struktur tertimbulkun menunjukkan bahwa SSI (*Soil Structure Interaction*) secara signifikan mempengaruhi desain struktur ini, terutama untuk struktur yang berada di dekat struktur eksisting lainnya atau yang terkubur dalam di bawah timbunan tinggi seperti *basement* . Demikian pula, kinerja, keamanan dan stabilitas struktur terkubur sangat bergantung pada desainnya, ketahanan materialnya, dan interaksinya dengan media tanah di sekitarnya. Oleh karena itu, memasukkan efek

SSI dalam analisis dan desain struktur terkubur sangat penting untuk ketahanan struktur tersebut, yang bertujuan untuk meningkatkan kinerjanya dan meminimalkan risiko kegagalan struktur (Nanggal,2021).

## 2.2.Prinsip Perencanaan Elemen Struktur Tahan Gempa

Untuk mengurangi kerusakan yang terjadi pada struktur bangunan yang diakibatkan oleh gempa, prinsip-prinsip dasar dalam perencanaan, perancangan dan pelaksanaan struktur bangunan harus diperhatikan. Menurut Hoedajanto dan Imran, (2002), prinsip-prinsip tersebut antara lain:

1. Sistem struktur harus disesuaikan dengan tingkat risiko daerah dimana struktur tersebut dibangun.
2. Sistem struktur harus bersifat kontinu dan utuh. Unsur-unsur bangunan termasuk penulangan harus efektif untuk meningkatkan integritas struktur. Perubahan kekakuan yang terlalu signifikan sebaiknya dihindari.
3. Asumsi sistem struktur dalam perencanaan desain tidak berubah-ubah.
4. Material yang digunakan seperti beton dan baja harus memenuhi persyaratan material konstruksi untuk bangunan tahan gempa.
5. Bagian arsitektural yang mempunyai massa yang masif harus menyatu dengan kuat pada sistem portal utama dan direncanakan pengaruhnya terhadap sistem struktur. Semakin besar massa bangunan, semakin besar pula beban inersia yang timbul akibat gempa. Oleh karena itu, penggunaan unsur arsitektural yang berat dihindari.
6. Sistem *quality control* dan *quality assurance* dalam metode pelaksanaan harus dilakukan dengan tepat sesuai dengan peraturan yang berlaku seperti SNI

1726:2012 untuk perhitungan gempa dan SNI 2847:2013 untuk persyaratan detailing struktur beton bertulang.

### 2.2.1. Gempa Rencana, Faktor Keutamaan dan Kategori Risiko Struktur Bangunan

Gempa rencana adalah gempa yang mempunyai peluang terjadi keruntuhan 2% ( $R_n = 2\%$  dari periode umur rencana bangunan 50 tahun sekali. Pengaruh beban gempa rencana ditinjau sebagai pengaruh pembebanan gempa yang berperilaku dinamik dan perencanaannya menggunakan analisis gaya gempa lateral ekuivalen yang mengacu pada SNI 1726:2012.

Berdasarkan SNI 1726:2012 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung Pasal 4.1.2, kategori risiko struktur bangunan gedung dan non gedung pengaruh gempa rencana terhadapnya harus dikalikan dengan faktor keutamaan ( $I_e$ ) seperti dalam tabel berikut ini:

Tabel 2. 1 Kategori risiko bangunan gedung dan non gedung untuk beban gempa

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
Gedung dan non gedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fasilitas pertanian, perkebunan, peternakan, dan perikanan</li> <li>- Fasilitas sementara</li> <li>- Gudang penyimpanan</li> <li>- Rumah jaga dan struktur kecil lainnya</li> </ul>	I
Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I,II,IV termasuk, tapi tidak dibatasi untuk : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Perumahan</li> <li>- Rumah toko dan rumah kantor</li> <li>- Pasar</li> </ul>	II

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gedung perkantoran</li> <li>- Gedung apartemen/ rumah susun</li> <li>- Pusat perbelanjaan/ mall</li> <li>- Bangunan industry</li> <li>- Fasilitas manufaktur</li> <li>- Pabrik</li> </ul>	
<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/ 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> <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, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak dimana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang</p>	<p>III</p>

dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran	
<p>Gedung dan non gedung, tidak termasuk kedalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/ 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> <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, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak dimana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran</p>	IV

Sumber : (Badan Standar Nasional, 2012)

Tabel 2. 2 Faktor keutamaan gempa

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

(Sumber : (Badan Standar Nasional, 2012)

### 2.2.2. Klasifikasi Situs dan Faktor Amplifikasi

Klasifikasi situs suatu struktur bangunan memberikan kriteria desain seismik berupa faktor-faktor amplifikasi pada bangunan. Faktor ini dapat menentukan

amplifikasi besaran percepatan gempa puncak dari batuan dasar ke permukaan tanah untuk suatu situs. Berdasarkan SNI 1726:2012 Klasifikasi kelas situs dibagi menjadi 6, yaitu sebagai berikut:

1. SA (Batuan Keras)
2. SB (Batuan)
3. SC (Tanah Sangat Padat dan Batuan Lunak)
4. SD (Tanah Sedang)
5. SE (Tanah Lunak)
6. SF (Lokasi yang membutuhkan penyelidikan geoteknik dan analisis respon spesifik).

Klasifikasi kelas situs ditentukan berdasarkan beberapa parameter yaitu, nilai uji penetrasi standar ( $\dot{N}$ ), kecepatan rambat gelombang geser ( $v_s$ ) atau kuat geser niralir ( $S_u$ ), untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 3, SNI 1726:2012. Adapun nilai  $S_s$  dan  $S_1$  didapat dari peta wilayah pada desain spektra Indonesia, seperti pada gambar 2.6

Results: Tabel dibawah ini merupakan Parameter untuk membuat Grafik Desain Spektra Indonesia:

Kelas	$T_0$ (detik)	$T_s$ (detik)	$S_{ds}(g)$	$S_{d1}(g)$
SD - Tanah Sedang	0.14	0.68	0.73	0.50

Rentang  $T(s)$  Value: 6

PGA MCEG: 0.4380 (g) bedrock

SS MCEr: 0.9851 (g) bedrock

S1 MCEr: 0.3052 (g) bedrock

TL: 12 Detik

Save

Gambar 2. 6 Parameter Grafik Desain Respon Spektra  
Sumber: (PuSGeN, 2021)

Untuk nilai  $F_a$  dan  $F_v$  ditentukan berdasarkan  $S_s$  dan  $S_1$  yang dapat dilihat pada tabel 2.3 dan tabel 2.4

Tabel 2. 3 Koefisien situs,  $F_a$ 

Kelas Situs	Parameter Respon Spektral Percepatan Gempa ( $MCE_R$ ) Terpetakan Pada Periode Pendek, $T = 0,2$ Detik, $S_s$				
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s \geq 1,25$
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 <sup>b</sup>				

Sumber : (Badan Standar Nasional, 2012)

Tabel 2. 4 Koefisien situs,  $F_v$ 

Kelas Situs	Parameter Respon Spektral Percepatan Gempa ( $MCE_R$ ) Terpetakan Pada Periode 1 Detik, $S_1$				
	$S_s \leq 0,1$	$S_s = 0,2$	$S_s = 0,3$	$S_s = 0,4$	$S_s \geq 0,5$
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 <sup>b</sup>				

Sumber : (Badan Standar Nasional, 2012)

### 2.2.3. Spectrum Respon Desain

Kategori Desain Seismik merupakan klasifikasi yang diberikan untuk struktur berdasarkan seismik dan keparahan dari gerakan desain gempa tanah di situs. Kategori desain seismik dimaksudkan untuk memastikan pendetailan struktur yang memenuhi persyaratan sesuai dengan intensitas gempa yang diperkirakan.

Parameter spektrum respon percepatan pada periode pendek dan periode 1 detik yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs, ditentukan dengan perumusan berikut :

$$S_{MS} = F_a S_s \dots\dots\dots (2.15)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \dots\dots\dots (2.16)$$

Parameter percepatan spektral desain untuk perioda pendek ( $S_{DS}$ ) dan parameter percepatan spektral desain perioda 1 detik ( $S_{D1}$ ), harus ditentukan melalui perumusan berikut

$$S_{DS} = 2/3.S_{MS} \text{ dimana } S_{MS} = F_a . S_s \dots\dots\dots (2.17)$$

$$S_{D1} = 2/3.S_{M1} \text{ dimana } S_{M1} = F_v . S_1 \dots\dots\dots (2.18)$$

Penentuan grafik respon spektrum berdasarkan perhitungan sebagai berikut:

1. Untuk periode yang lebih kecil dari  $T_0$ ,

$$S_a = S_{DS} (0,4 + 0,6(T/T_0)) \dots\dots\dots (2.19)$$

2. Untuk periode yang lebih besar dari atau sama dengan  $T_0$  dan lebih kecil dari atau sama dengan  $T_s$ ,  $S_a$  sama dengan  $S_{DS}$ .

3. Untuk periode lebih besar dari  $T_s$ ,  $S_a$  diambil berdasarkan persamaan

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \dots\dots\dots (2.20)$$

4. Untuk periode lebih besar dari  $T_L$ , respons spektral percepatan desain,  $S_a$ ,

diambil berdasarkan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \dots\dots\dots (2.21)$$

Keterangan:

$S_s$  = parameter spektral percepatan gempa MCER terpetakan untuk periode pendek

$S_1$  = parameter respons spektral percepatan gempa MCER terpetakan perioda 1 detik.

$F_a$  = faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran perioda pendek.

$F_v$  = faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran perioda 1 detik.

$S_{MS}$  = parameter spektrum respons percepatan perioda pendek.

$S_{D1}$  = parameter spektrum respons percepatan perioda 1 detik.

$SDS$  = parameter respons spectral percepatan desain pada periode pendek

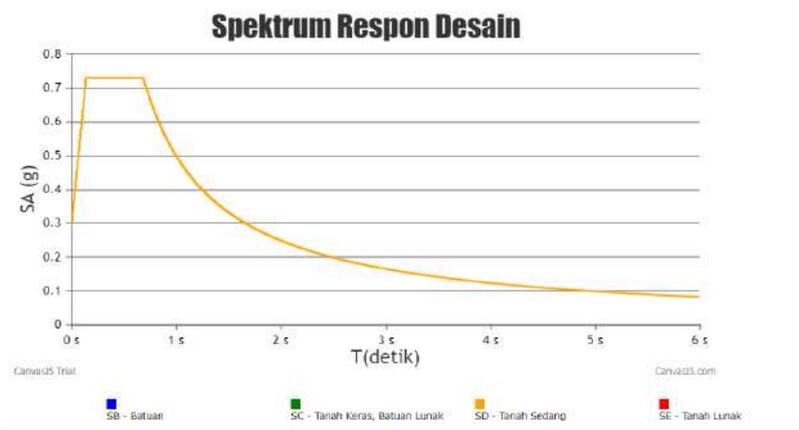
$SD1$  = parameter respons spectral percepatan desain pada periode 1 detik

$T$  = periode getar fundamental struktur

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.22)$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.23)$$

$T_L$  = Peta transisi panjang ditunjukkan pada grafik spectrum respons desain.



Gambar 2. 7 Gempa Respon Spektra  
Sumber: (Cipta Karya,2021)

#### 2.2.4. Kategori Desain Seismik

Berdasarkan nilai  $S_{DS}$  dan  $S_{D1}$ , maka kategori desain seismik bangunan dapat ditentukan sesuai tabel berikut:

Tabel 2. 5 Kategori Desain Seismik Berdasarkan  $S_{DS}$ 

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

Sumber : (Badan Standar Nasional, 2012, Tabel 6)

Tabel 2. 6 Kategori Desain Seismik Berdasarkan  $S_{D1}$ 

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

Sumber : (Badan Standar Nasional, 2012, Tabel 7)

Berdasarkan SNI 1726:2012 KDS berkaitan dengan level bahaya gempa, jenis tanah, serta penggunaan dan fungsi gedung. Macam - macam Kategori Desain Seismik mulai dari KDS A sampai F, dan secara umum memiliki arti :

1. KDS A – Gempa Berisiko Rendah,
2. KDS B, C – Gempa Berisiko Sedang,
3. KDS D – Gempa Berisiko Tinggi,
4. KDS E, F – Gempa Berisiko Tinggi.

### 2.2.5. Sistem Struktur Beton Bertulang Pemikul Momen Gempa

Sistem pemikul gaya horizontal dan vertikal dasar harus memenuhi salah satu tipe yang ditunjukkan dalam tabel dibawah ini:

Tabel 2. 7 Faktor R,  $\Omega_0$ , dan Cd untuk Sistem Pemikul Gaya Gempa

Sistem Penahan Gaya Seismik	Koefisien Modifikasi Respons, $R^a$	Faktor Kuat Lebih Sistem, $\Omega_0^g$	Faktor Pembesaran Defleksi $C_d^b$	Batasan Sistem Struktur Dan Batasan Tinggi Struktur, $H^n$ (M)				
				Kategori Desain Seismik				
				B	C	D <sup>d</sup>	E <sup>d</sup>	F <sup>e</sup>
Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	8	3	5,5	TB	TB	TB	TB	TB
Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4,5	TB	TB	TI	TI	TI

Sumber : (Badan Standar Nasional, 2012, Tabel 9)

Berdasarkan tabel 2.7 Sistem penahan gaya seismik yang memenuhi batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur untuk kategori desain seismik D yaitu rangka beton bertulang pemikul momen khusus. Pada sistem penahan gaya seismik lainnya untuk kategori desain seismik D tidak diijinkan (TI).

Keterangan :

TB = Tidak Dibatasi

TI = Tidak Diizinkan

### 2.2.6. Faktor Redundansi

Faktor redundansi untuk struktur dengan kategori desain seismik D, E dan F diambil nilai sebesar 1,3. Faktor redundansi bernilai 1 dapat digunakan jika:

1. Masing-masing tingkat yang menahan lebih dari 35 persen geser dasar dalam arah yang ditinjau.
2. Struktur dengan denah beraturan di semua tingkat dengan sistem penahan gaya gempa terdiri dari paling sedikit dua bentang perimeter penahan gaya gempa

yang merangka pada masing-masing sisi struktur dalam masing-masing arah ortogonal di setiap tingkat yang menahan lebih dari 35 persen geser dasar.

### 2.2.7. Kombinasi Beban

Pembebanan mengikuti kombinasi beban sesuai dengan SNI 1726:2012 sebagai berikut:

1.  $1,4D$
2.  $1,2D + 1,6L + 0,5(Lr \text{ atau } R)$
3.  $1,2D + 1,6(Lr \text{ atau } R) + (L \text{ atau } 0,5W)$
4.  $1,2D + 1,0W + L + 0,5(Lr \text{ atau } R)$
5.  $1,2D + 1,0E + L$
6.  $0,9D + 1,0W$
7.  $0,9D + 1,0E$

Keterangan:

- D = Beban Mati  
 L = Beban Hidup  
 Lr = Beban Hidup Atap  
 R = Beban Air Hujan  
 W = Beban Angin  
 E = Beban Gempa

Pada kombinasi pembebanan, pengaruh beban gempa ditentukan sebagai berikut:

1. Beban gempa dalam kombinasi nomor 5 ditentukan sesuai:

$$E = E_h + E_v$$

2. Beban gempa dalam kombinasi nomor 7 ditentukan sesuai:

$$E = E_h - E_v$$

Dengan :

$$E_h = \rho Q_E$$

$$E_v = 0,2S_{DS}D$$

Keterangan :

$E_h$  = pengaruh beban gempa horizontal

$E_v$  = pengaruh beban gempa vertikal

### 2.2.8. Analisis Gaya Lateral Ekuivalen

Analisis gaya lateral ekuivalen merupakan perhitungan yang disederhanakan dari beban gempa sebenarnya, penyederhanaan menjadi gaya horizontal diakibatkan dari gaya inersia yang bekerja di suatu massa akibat gempa. Pembebanan gempa yang sebenarnya bersumber dari gerakan tanah di dasar, yang kemudian menjalar pada elemen bangunan. (Rifandi, 2020)

Adapun prosedur gaya lateral ekuivalen:

#### 1. Geser Dasar Seismik

Geser dasar seismik berdasarkan SNI 1726:2012 ditentukan sebagai berikut:

$$V = C_s W_t \dots\dots\dots (2.24)$$

Keterangan :

$C_s$  = koefisien respons seismik yang ditentukan sesuai dengan SNI 03  
1726:2010 pasal 7.8.1.1

$W$  = berat seismik efektif

Koefisien respons seismik,  $C_s$ , harus ditentukan sesuai dengan Persamaan berikut:

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left[\frac{R}{I_e}\right]} \dots\dots\dots(2.25)$$

Dengan nilai  $C_s$  tidak boleh melebihi:

$$C_s = \frac{S_{D1}}{T\left[\frac{R}{I_e}\right]} \dots\dots\dots(2.26)$$

$C_s$  harus tidak kurang dari:

$$C_s = 0,44SDSI_e \geq 0,01 \dots\dots\dots(2.27)$$

Keterangan :

$S_{DS}$  = parameter percepatan spektrum respons desain dalam rentang periode pendek seperti ditentukan pada SNI 1726 : 2012 pasal 6.3 atau 6.9

$R$  = faktor modifikasi respons berdasarkan SNI 1726 : 2012 Tabel 9.

$I_e$  = faktor keutamaan hunian yang ditentukan sesuai dengan SNI 1726 : 2012 pasal 4.1.2.

$S_{D1}$  = parameter percepatan spektrum respons desain pada periode sebesar 1,0 detik, seperti ditentukan pada SNI 1726 : 2012 pasal 6.10.4

$T$  = periode struktur dasar (detik) yang ditentukan pada SNI 1726 : 2012 pasal 7.8.2

## 2. Periode Alami Fundamental

Periode fundamental struktur ( $T$ ) tidak boleh melebihi hasil koefisien untuk batasan atas pada periode yang dihitung ( $C_u$ ) dari Tabel 2.8 dan periode fundamental ( $T_a$ ) pendekatan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$T_a = C_u h_n^x \dots\dots\dots(2.28)$$

Keterangan :

$h_n$  = ketinggian struktur (m)

$T_a$  = nilai batas bawah periode struktur

$C_t$  = Koefisien periode

$x$  = Jumlah efektif dalam menahan gaya lateral dalam arah yang ditinjau

Tabel 2. 8 Parameter Percepatan Respons

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 : (Badan Standar Nasional, 2012, Tabel 14)

Tabel 2. 9 Nilai parameter periode

Tipe Struktur	$C_t$	$x$
Sistem rangka pemikul momen di mana rangka memikul 100% gaya gempa yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai beban 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 : (Badan Standar Nasional, 2012, Tabel 15)

### 3. Distribusi Vertikal Gaya Gempa

Gaya gempa lateral per tingkat ditentukan dengan persamaan:

$$F_x = C_{vx}V \dots\dots\dots(2.29)$$

$$C_{vx} = \frac{C_{vx}h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_x^k} \dots\dots\dots(2.30)$$

Keterangan:

$C_{vx}$  = faktor distribusi vertikal

$V$  = gaya lateral desain total atau geser di dasar struktur (W) (kN)

$w_i$  dan  $w_x$  = bagian berat seismik efektif total struktur (W) pada tingkat i

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

$k$  = eksponen yang terkait dengan periode struktur

= 1 (untuk T kurang atau sama dengan 0,5 detik).

= 2 (untuk T lebih besar atau sama dengan 2,5 detik).

=  $1 + (T - 0,5)/2$  (untuk T antara 0,5 detik sampai 2,5 detik)

### 4. Distribusi Horizontal Gaya Gempa

Geser tingkat desain gempa di semua tingkat ( $V_x$ ) (kN) harus ditentukan dari persamaan berikut:

$$V_x = \sum_{i=1}^n F_i \dots\dots\dots(2.31)$$

Keterangan:

$F_i$  = bagian dari geser seismik gaya dasar yang timbul di tingkat i (kN)

#### 2.2.9. Penentuan Simpangan Antar Lantai

Defleksi pusat massa di tingkat x ( $\delta_x$ ) (mm) harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut ini:

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{I_e} \dots\dots\dots(2.32)$$

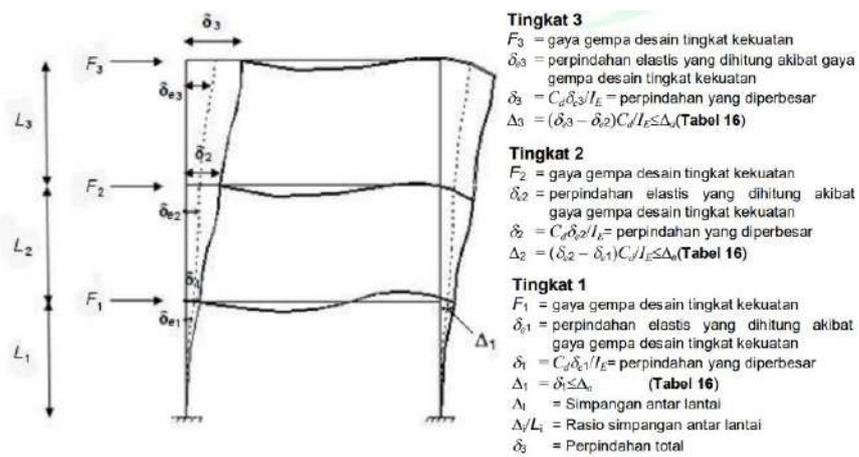
Keterangan :

$C_d$  = faktor amplifikasi defleksi

$\delta_{xe}$  = defleksi pada lokasi yang diisyaratkan dengan analisis elastis

$I_e$  = faktor keutamaan gempa

$\Delta a$  = simpangan antarlantai izin merujuk pada (Tabel 16, SNI 1726:2012)



Gambar 2. 8 Penentuan Simpangan Antar Lantai  
 Sumber: (Badan Standar Nasional,2012)

Tabel 2. 10 Simpangan Antar Lantai ijin,  $\Delta_a$

Struktur	Kategori Risiko		
	I atau II	III	IV
Struktur, selain selain dari struktur dinding geser atau bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar lantai tigkat	$0,025 h_{sx}^c$	$0,020 h_{sx}$	$0,015 h_{sx}$
Struktur dinding geser kantileverbata bata <sup>d</sup>	$0,010 h_{sx}$	$0,010 h_{sx}$	$0,010 h_{sx}$
Struktur dinding geser batu bata lainnya	$0,007 h_{sx}$	$0,007 h_{sx}$	$0,007 h_{sx}$
Semua struktur lainnya	$0,020 h_{sx}$	$0,015 h_{sx}$	$0,010 h_{sx}$

Sumber : (Badan Standar Nasional,2012, Tabel 16)

### 2.3. Kinerja Struktur dan Analisis Statik NonLinear *Pushover*

Berdasarkan penelitian pada Skripsi I Ketut Diartama Kubon Tubuh Perencanaan struktur bangunan umumnya didasarkan pada ketentuan-ketentuan dan batasan-batasan yang terdapat pada peraturan setempat, yang dibuat untuk menghindarkan adanya korban jiwa pada saat terjadi gempa besar atau mengurangi kerusakan dan kerugian harta benda pada saat terjadi gempa sedang. Namun, prosedur yang disyaratkan di peraturan tidak secara eksplisit menjamin baik atau tidaknya kinerja struktur tersebut saat gempa terjadi. Padahal, alangkah baiknya jika kinerja tersebut dapat diperkirakan sehingga pemilik atau penyanggah dana dapat mengetahui secara lebih jelas seberapa besar risiko yang akan ditanggungnya dengan sejumlah dana yang dikeluarkan. Perencana struktur dapat menawarkan kepada pemilik atau penyanggah dana secara kuantitatif sekuat apa bangunan yang akan didirikan. Dari sinilah bermula pemikiran tentang perencanaan berbasis kinerja (*Performance based design*).

Perencanaan tahan gempa berbasis kinerja (*Performance-based seismic design*) merupakan proses yang dapat digunakan untuk perencanaan bangunan baru maupun perkuatan (*upgrade*) bangunan yang sudah ada, dengan pemahaman yang realistis terhadap risiko keselamatan (*life*), kesiapan pakai (*occupancy*) dan kerugian harta benda (*economic loss*) yang mungkin terjadi akibat gempa yang akan datang. Proses perencanaan tahan gempa berbasis kinerja dimulai dengan membuat model rencana bangunan kemudian melakukan simulasi kinerjanya terhadap berbagai kejadian gempa. Setiap simulasi memberikan informasi tingkat kerusakan (*level of damage*), ketahanan struktur, sehingga dapat memperkirakan berapa besar

keselamatan, kesiapan pakai dan kerugian harta benda yang akan terjadi. (Dewobroto, 2005)

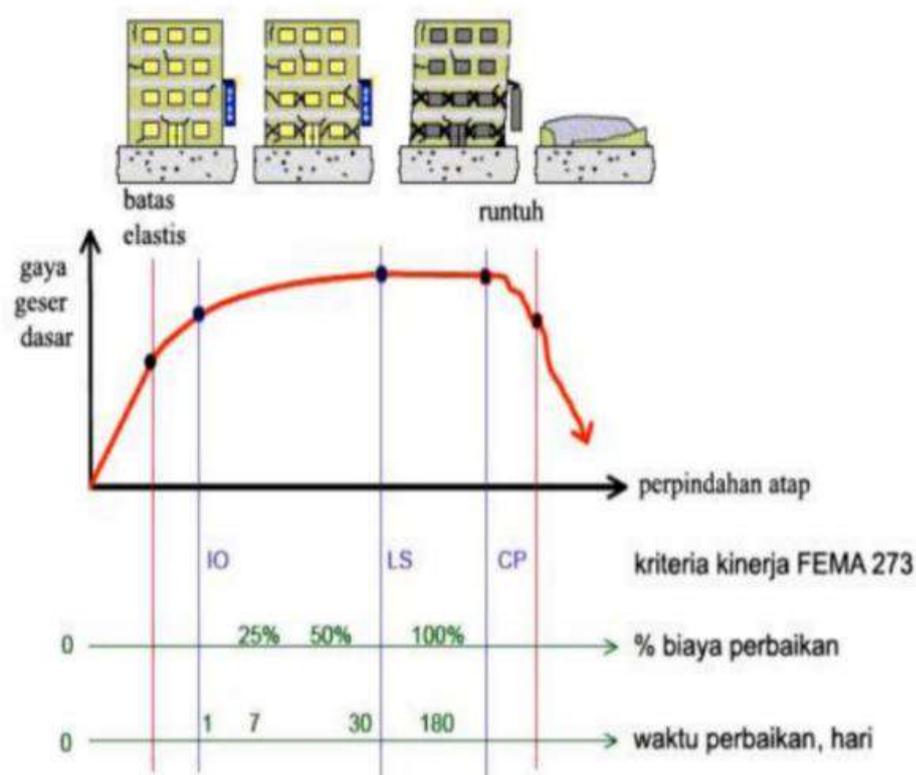
Pada FEMA 273 (*Building Seismic Safety Council, 1997*), yang merupakan acuan klasik terhadap perencanaan berbasis kinerja, disebutkan kategori-kategori level kinerja struktur sebagai berikut :

1. *Operational*, tak ada kerusakan berarti pada struktur dan non-struktur, bangunan tetap berfungsi.
2. *Immediate Occupancy (IO)*, jika struktur tidak terdapat kerusakan yang berarti pada komponen struktural maupun non struktural. Tidak terjadi pergeseran permanen pada bangunan, sebagian besar struktur dapat mempertahankan kekuatan dan kekakuannya, sedikit retak serta semua sistem penting pada gedung dapat beroperasi dengan normal.
3. *Life Safety (LS)*, jika struktur masih mampu menahan beban gempa dengan sedikit kerusakan. Komponen non-struktural masih aman tetapi terjadi kerusakan pada beberapa utilitas. Perbaikan kerusakan dapat dilakukan tanpa mengganggu fungsi dari struktur bangunan.
4. *Collapse Prevention (CP)*, jika struktur mengalami kerusakan tetapi belum runtuh. Terjadi perubahan kekakuan struktur. Kecelakaan yang diakibatkan jatuhnya material sangat mungkin terjadi.

Kinerja struktur dapat dilihat dari kemampuan struktur tersebut menerima gaya gempa yang kuat. Struktur diharapkan mampu menyebar gaya-gaya dalam ke seluruh elemen-elemen strukturnya sehingga gaya-gaya dalam tersebut tidak terfokus di beberapa elemen stuktur saja. Sehingga struktur dengan kinerja yang

baik masih memiliki kemampuan untuk bertahan dari gempa meskipun sudah mencapai ambang keruntuhan.

Hal penting dari perencanaan berbasis kinerja adalah sasaran kinerja bangunan terhadap gempa dinyatakan secara jelas, sehingga pemilik, penyewa, asuransi, pemerintahan atau penyandang dana mempunyai kesempatan untuk menetapkan kondisi apa yang dipilih, selanjutnya ketentuan tersebut digunakan insinyur perencana sebagai pedomannya. Berikut adalah ilustrasi level kinerja suatu struktur bangunan yang digambarkan secara bersamaan dengan kurva hubungan perpindahan pada atap terhadap gaya geser dasar yang bekerja.



Gambar 2. 9 Ilustrasi *Performance Level FEMA 273/356*

Sumber: (Dewobroto, 2007)

Pada gambar 2.9 menurut ATC-58 (*Structural Performance Products Team, 2004*) menjelaskan secara kualitatif level kinerja/*Performance levels* pada FEMA 273 yang digambarkan dengan suatu kurva hubungan gaya geser dasar ( $V$ ) dan

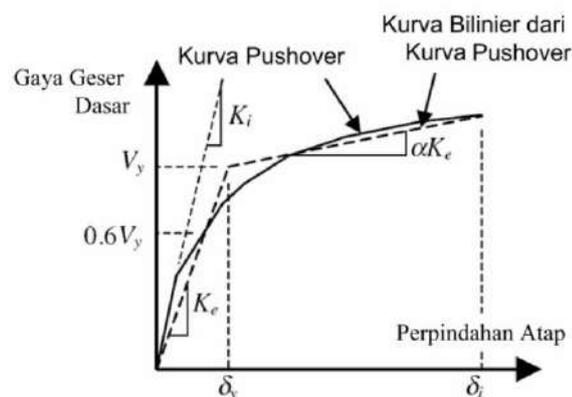
perpindahan titik acuan ( $D$ ) yang menunjukkan perilaku struktur secara menyeluruh (*global*) terhadap pembebanan lateral. Kurva tersebut dihasilkan dari analisis statik non linier khusus yang dikenal sebagai analisis *Pushover*, sehingga disebut juga sebagai kurva *Pushover*. Sedangkan titik kinerja (*Performance point*) merupakan besarnya perpindahan atap pada saat mengalami gempa rencana. Di atas kurva *Pushover* dapat digambarkan secara kualitatif kondisi kerusakan yang terjadi pada level kinerja yang ditetapkan agar kurva di bawahnya dapat memberikan bayangan seberapa besar kerusakan itu terjadi. Selain itu dapat juga dikorelasikan berapa persentase biaya dan waktu yang diperlukan untuk perbaikan. Informasi itu tentunya sekedar gambaran perkiraan, meskipun demikian sudah mencukupi untuk mengambil keputusan apa yang sebaiknya harus dilakukan terhadap hasil analisis bangunan tersebut.

Analisis *Pushover* menurut ATC-40 (*California Seismic Safety Commission*, 1996) adalah suatu analisis statik non linier dimana pengaruh gempa rencana terhadap struktur bangunan gedung dianggap sebagai beban-beban statis yang bekerja 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 plastis. Analisis dilakukan dengan memberikan suatu pola beban lateral statis pada struktur, yang kemudian ditingkatkan secara bertahap sampai suatu perpindahan target, kemudian menghasilkan kurva *Pushover*. (Utomo, Susanto, Tujono, & Wibowo, 2012)

Analisis *Pushover* dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh level kinerja dan deformasi yang terjadi, serta untuk memperoleh informasi bagian struktur yang kritis terhadap gempa sehingga dapat diidentifikasi bagian-bagian yang memerlukan perhatian khusus untuk pendetailan dan stabilitasnya. Dalam melakukan analisis *Pushover* perlu dilakukan penentuan letak sendi plastis pada ujung-ujung balok dan kolom karena perilaku sendi plastis pada elemen-elemen struktur mempengaruhi kinerja struktur secara global.

### 2.3.1. Waktu Getar Alami Efektif

Analisa eigen-value pada umumnya digunakan untuk mengetahui waktu getar alami bangunan, dimana informasi tersebut sangat penting untuk mendapatkan estimasi besarnya gaya gempa yang akan diterima oleh bangunan tersebut. Analisa eigen-value dilaksanakan menggunakan data-data yang masih dalam kondisi elastis linier, padahal pada saat gempa kondisi bangunan mengalami keadaan yang berbeda, yaitu berperilaku inelastis. Oleh karena itu waktu getar alami bangunan pada saat gempa maksimum berbeda dengan hasil analisa eigen-value. Waktu getar alami yang memperhitungkan kondisi inelastis atau waktu getar efektif,  $T_e$ , dapat diperoleh dengan bantuan kurva hasil analisa *pushover*.



Gambar 2. 10 Parameter Waktu Getar Fundamental Efektif dari Kurva *Pushover*  
Sumber: (Dewobroto, 2007)

Untuk itu, kurva *pushover* diubah menjadi kurva bilinear untuk mengestimasi kekakuan lateral efektif bangunan,  $K_e$ , dan kuat leleh bangunan,  $V_y$ . Kekakuan lateral efektif dapat 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 inelastis ( $\alpha K_e$ ), maka prosesnya dilakukan secara trial-error. Selanjutnya waktu getar alami efektif,  $T_e$  dihitung sebagai:

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \dots\dots\dots (2.33)$$

Dimana  $T_i$  dan  $K_i$  adalah perioda alami awal elastis (dalam detik) dan kekakuan awal bangunan pada arah yang ditinjau.

### 2.3.2. Metode Koefisien Perpindahan (FEMA 356)

Merupakan metoda utama yang terdapat dalam FEMA 273/356 untuk prosedur statik nonlinier. Penyelesaian dilakukan dengan memodifikasi respons elastis linier dari sistem SDOF ekuivalen dengan faktor koefisien  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  dan  $C_3$  sehingga diperoleh perpindahan global maksimum (elastis dan inelastis) yang disebut target perpindahan ( $\delta_T$ ).

Proses dimulai dengan menetapkan waktu getar efektif ( $T_e$ ) yang memperhitungkan kondisi inelastis bangunan (lihat bagian tentang waktu getar alami). Waktu getar alami efektif mencerminkan kekakuan linier dari sistem SDOF ekuivalen. Jika diplotkan pada spektrum respons elastis akan menunjukkan percepatan gerakan tanah pada saat gempa yaitu akselerasi puncak ( $S_a$ ) versus waktu getar ( $T$ ). Rendaman yang digunakan selalu 5% yang mewakili level yang diharapkan terjadi pada struktur yang mempunyai respons pada daerah elastis.

Puncak perpindahan spektra elastis ( $S_d$ ) berhubungan langsung dengan akselerasi spektra ( $S_a$ ) dengan hubungan berikut:

$$S_d = \frac{T_e^2}{4\pi^2} S_a \dots\dots\dots (2.34)$$

Selanjutnya target perpindahan pada titik kontrol  $\delta_T$ , ditentukan dari rumus berikut:

$$\delta_T = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \dots\dots\dots (2.35)$$

Dimana:

$T_e$  = waktu getar alami efektif yang memperhitungkan kondisi inelastik

$C_0$  = koefisien faktor bentuk, untuk merubah perpindahan spektral menjadi perpindahan atap, umumnya memakai faktor partisipasi ragam yang pertama (first mode participation factor) atau berdasarkan Tabel 3-2 dari FEMA 356.

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

= 1.0 untuk  $T_e \geq T_S$

=  $[1.0 + (R - 1)T_S / T_e] / R$  untuk  $T_e < T_S$

$T_S$  = waktu getar karakteristik yang diperoleh dari kurva respons spektrum pada titik dimana terdapat transisi bagian akselerasi konstan ke bagian kecepatan konstan.

$R$  = rasio kuat elastik perlu terhadap koefisien kuat leleh terhitung.

$S_a$  = akselerasi respons spektrum yang berkesesuaian dengan waktu getar alami efektif pada arah yang ditinjau.

$V_y$  = gaya geser dasar pada saat leleh, dari idealisasi kurva *pushover* menjadi bilinier.

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

- $C_m$  = faktor massa efektif yang diambil dari Tabel 3-1 dari FEMA 356.
- $C_2$  = koefisien untuk memperhitungkan efek pinching dari hubungan bebandeformasi akibat degradasi kekakuan dan kekuatan, berdasarkan Tabel 3-3 dari FEMA 356.
- $C_3$  = koefisien untuk memperhitungkan pembesaran lateral akibat adanya efek P-delta. Koefisien diperoleh secara empiris dari studi statistik analisa riwayat waktu non-linier 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 negatif (kurva menurun)
- $$C_3 = 1,0 + \frac{|\alpha|(R-1)^{3/2}}{T_e} \dots\dots\dots(2.36)$$
- $\alpha$  = rasio kekakuan pasca leleh terhadap kekakuan elastik efektif, dimana hubungan gaya lendutan diidealisasikan sebagai kurva bilinier.
- $g$  = percepatan gravitasi 9.81 m/det<sup>2</sup>.

### 2.3.3. Displacement control

*Displacement control* merupakan parameter yang digunakan sebagai besarnya perpindahan struktur jika besar beban tidak diketahui. *Displacement control* berguna untuk menganalisis struktur dalam kondisi inelastis dan kehilangan kapasitas angkut beban selama berlangsungnya analisis. Berdasarkan FEMA 356, besar perpindahan untuk displacement control sebesar 2% dari tinggi struktur.

### 2.4. Teknik Pemodelan

Karena yang dievaluasi adalah komponen maka jumlahnya relatif sangat banyak, oleh karena itu analisa *pushover* sepenuhnya harus dikerjakan oleh

komputer (fasilitas *pushover* dan evaluasi kinerja yang terdapat secara built-in pada program SAP2000, mengacu pada FEMA 356). Adapun Tahapan utama dalam analisa *pushover* yaitu:

1. Tipe hinge properties yang dipakai untuk balok adalah momen M3, yang berarti sendi plastis terjadi hanya karena momen searah sumbu lokal 3.
2. Pada analisis *pushover* dari SAP2000 untuk memasukan nilai batasan momen leleh balok ada 2 pilihan yaitu nilai batas momen leleh positif dan momen leleh negatif.
3. Tipe hinge properties untuk kolom bawah adalah P-M-M yang artinya sendi plastis terjadi karena interaksi gaya aksial dan momen. Kekuatan kolom dimasukkan dalam bentuk kurva P-M.
4. Beban untuk analisis statik *pushover* adalah berupa beban joint dalam arah lateral yang diberikan dipusat massa masing-masing lantai, oleh karena itu pada *static pushover* dipilih *push to load level Define d by pattern*.
5. Efek non – linear dari geometri struktur pada analisis *pushover* diberikan melalui efek P –  $\Delta$ .
6. Metode perhitungan yang dipilih untuk dilakukan jika terjadi sendi plastis adalah *apply local redistribution*.
7. Panjang sendi plastis pada analisis *pushover* hanya dapat dinyatakan sebagai panjang relatif 0 dan 1, yang berarti sendi plastis terletak di joint – joint pertemuan balok dan kolom.