



**REKAYASA GEMPA:**  
Pemahaman Teoritis



# **REKAYASA GEMPA:** Pemahaman Teoritis

Masrilayanti  
Jati Sunaryati  
Ruddy Kurniawan

**Minangkabau Press**

**Rekayasa Gempa:  
Pemahaman Teoritis**

**Penulis:**

Masrilayanti, Jati Sunaryati, & Ruddy Kurniawan

**Editor:**

Suharmono

**Desain Cover:**

Masrilayanti

**Tata Letak :**

Faricha

Cetakan I Desember 2023

xiv + 156 hlm, 14 x 20,5 cm

ISBN: 978-623-7749-36-3

Diterbitkan pertama kali oleh:

**Minangkabau Press**

Perumahan Unand Blok D I – 07 – 04 Gadut

Padang, Sumatera Barat

Kontak Person Bahren: 0852 6390 3352

e-mail: minangkabau.press99@gmail.com

Hak Cipta dilindungi Undang-Undang.

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebahagian atau seluruh isi buku  
tanpa izin tertulis penerbit

Isi diluar tanggung jawab percetakan

Ketentuan Pidana Pasal 72 UU No. 19 Tahun 2002

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam pasal 2 ayat (1) atau pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp 1.000.000,- (satu juta rupiah) atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 5.000.000.000,- (lima milyar rupiah).
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara selama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 500.000.000,- (lima ratus juta rupiah).

## *Prakata*

**B**uku yang berjudul *Rekayasa Gempa Pemahaman Teoritis*, hadir sebagai upaya kami untuk menyajikan pengetahuan yang komprehensif dan aplikatif mengenai rekayasa gempa di tengah kompleksitas tantangan zaman ini.

Dalam perjalanannya, buku ini mengupas berbagai aspek penting terkait gempa bumi, mulai dari dasar-dasar teori kegempaan hingga aplikasi praktis dalam desain struktur tahan gempa. Kami merancang buku ini dengan harapan agar dapat menjadi panduan yang bermanfaat bagi mahasiswa, praktisi rekayasa, dan siapa pun yang tertarik untuk mendalami rekayasa gempa.

Dengan dukungan dari berbagai sumber daya dan para ahli yang memberikan pandangan mereka, buku ini memadukan teori dan praktik secara seimbang. Kami percaya bahwa pengetahuan yang kuat dalam rekayasa gempa bukan hanya menjadi kebutuhan, tetapi juga menjadi kunci untuk menghadapi risiko gempa bumi dengan lebih baik.

Terima kasih kepada semua yang telah berkontribusi dalam perjalanan penyusunan buku ini. Semoga buku ini dapat menjadi sumber rujukan yang bermanfaat, membantu membuka wawasan, dan memberikan kontribusi positif bagi

pengembangan ilmu rekayasa gempa di Indonesia dan di seluruh dunia.

Selamat membaca, dan semoga buku ini memberikan nilai tambah yang berarti dalam perjalanan pendidikan dan pengembangan pengetahuan struktur tahan gempa.

Penulis

# *Daftar Isi*

Prakata .....	v
Daftar Isi .....	vii
Daftar Gambar .....	xi
Daftar Tabel.....	xi

BAB 1	PENGANTAR KULIAH REKAYASA	
	GEMPA .....	1
1.1..	Umum .....	1
1.2..	Deskripsi Mata Kuliah.....	1
1.3..	Metode Pengajaran dan Penilaian .....	2
1.4..	Panduan Pemakaian Buku oleh Dosen.....	3
1.5..	Panduan Pemakaian Buku oleh Mahasiswa..	4
BAB 2	MENGENAL GEMPA BUMI .....	5
2.1..	Capaian Pembelajaran .....	5
2.2..	Relevansi .....	5
2.3..	Pengantar Gempa Bumi.....	6
2.4..	Jenis Gelombang Gempa.....	15
2.5..	Mengukur Kekuatan Gempa Bumi .....	16
2.6..	Gempa Bumi Besar dalam Sejarah.....	19
2.7	Keruntuhan Infrastruktur akibat Gempa Bumi .....	22
2.8..	Tugas dan Latihan .....	26
BAB 3	KONSEP DISAIN STRUKTUR TAHAN	
	GEMPA .....	27
3.1..	Capaian Pembelajaran .....	27
3.2..	Relevansi .....	27

3.3. Struktur Tahan Gempa.....	27
3.4 Mekanisme Kerja Beban Gempa pada Struktur Bangunan .....	37
3.5. Perilaku Material akibat Gempa Bumi.....	41
3.6 Penyebab Kerusakan Akibat Gempa dan Cara Pencegahannya .....	42
3.7. Peraturan Kegempaan di Indonesia .....	47
3.8. Tugas dan Latihan .....	56
<b>BAB 4 DISAIN RESPONS SPEKTRUM BERDASARKAN SNI 1726:2019 .....</b>	<b>57</b>
4.1. Capaian Pembelajaran.....	57
4.2. Relevansi.....	57
4.3. Pengertian Respons Spektrum .....	58
4.4 Disain Respons Spektrum Berdasarkan Code .....	62
4.5 Disain Respons Spektrum Berdasarkan Website.....	66
4.6. Contoh Kasus.....	67
4.7. Tugas dan Latihan .....	75
<b>BAB 5 ANALISIS BEBAN GEMPA DENGAN METODE STATIK EKIVALEN.....</b>	<b>76</b>
5.1. Capaian Pembelajaran.....	76
5.2. Relevansi.....	76
5.3. Pengantar Umum.....	77
5.4. Persyaratan untuk Metode Statik Ekivalen	79
5.5. Gaya Geser Dasar Seismik.....	81
5.6. Simpangan Antar Lantai .....	84
5.7. Prosedur dalam Metode Statik Ekivalen .....	86
5.8. Contoh Kasus.....	87
5.9. Tugas dan Latihan .....	97

BAB 6 ANALISIS BEBAN GEMPA DENGAN	
METODE RESPONS SPEKTRUM .....	98
6.1..Capaian Pembelajaran .....	98
6.2..Relevansi .....	98
6.3..Pengantar Umum .....	99
6.4 Prosedur Analisis Beban Gempa dengan	
Respons Spektrum.....	104
6.5..Contoh Kasus .....	106
6.6..Tugas dan Latihan .....	111
BAB 7 ANALISIS BEBAN GEMPA DENGAN	
METODE ANALISIS RIWAYAT WAKTU.....	112
7.1..Capaian pembelajaran .....	112
7.2..Relevansi .....	112
7.3..Pengantar umum.....	112
7.4..Keuntungan Analisis Riwayat Waktu .....	115
7.5 Penggunaan data gempa riwayat waktu	
dalam SNI 1726.....	116
7.6..Analisis dua dimensi.....	118
7.7..Analisis tiga dimensi.....	118
7.8 Penyelesaian persamaan dinamik	
analisis riwayat waktu.....	119
7.9..Integral Duhamel .....	122
7.10Nonlinear SDOF System .....	126
7.11Nonlinear MDOF System.....	127
7.12Formulasi Persamaan Gerak Bangunan	
Geser.....	129
7.13Database Riwayat Gempa.....	136
7.14Tugas dan Latihan .....	137
BAB 8 ANALISIS NON-LINIER BANGUNAN TAHAN	
GEMPA (pengayaan).....	138
8.1..Capaian Pembelajaran .....	138
8.2..Relevansi .....	138
8.3..Pengantar Umum .....	138
8.4..Pushover Analysis .....	142

8.5 Non Linear Time History Analysis (NLTHA).....	150
8.6. Incremental Dynamic Analysis.....	151
8.7. Tugas dan Latihan.....	155
REFERENSI .....	156

## *Daftar Gambar*

Gambar 2-1	Lempeng tektonik di Indonesia.....	8
Gambar 2-2	Pelat tektonik di dunia.....	9
Gambar 2-3	Pola pergerakan lempeng.....	10
Gambar 2-4	Posisi gempa bumi dalam himpunan bencana alam dunia (sumber: <a href="https://ourworldindata.org/">https://ourworldindata.org/</a> ).....	12
Gambar 2-5	Notasi gempa bumi.....	13
Gambar 2-6	Gelombang Badan dan Gelombang Permukaan.....	16
Gambar 2-7	Perbandingan lepasan energi dari ledakan dengan magnitude gempa bumi (sumber: Bravo and Ortiz (2005); Andrea et al. (2011)).....	19
Gambar 2-8	Besarnya kerugian jiwa akibat bencana alam termasuk gempa bumi (sumber: <a href="https://ourworldindata.org/">https://ourworldindata.org/</a> ).....	22
Gambar 3-1	Konstruksi di zaman Mesopotamia.....	30
Gambar 3-2	Perilaku struktur daktail dan getas (sumber: <a href="https://hesa.co.id/konsep-daktailitas-pada-struktur-bangunan">https://hesa.co.id/konsep- daktailitas-pada-struktur-bangunan</a> ).....	34
Gambar 3-3	Keruntuhan soft-storey	
Gambar 3-4	Deformasi elastis (a) dan plastis (b) pada struktur.....	38
Gambar 4-1	Hubungan antara respons puncak pada periode yang berbeda dengan spektrum.....	60
Gambar 4-2	Hubungan antara respons puncak pada periode yang berbeda dengan spektrum.....	60
Gambar 4-3	Respons spektrum rencana.....	66
Gambar 4-4	Tampilan situs.....	67

Gambar 4-5 Tampilan hasil di situs .....	67
Gambar 5-1 Prinsip analisis statik linier (berdasarkan FEMA-273).....	82
Gambar 5-2 Perhitungan gaya antar lantai .....	85
Gambar 6-1 Bentuk ragam pertama yang disederhanakan untuk struktur gedung dengan ketinggian kurang dari 40 m .....	101
Gambar 6-2 Kombinasi gaya gempa untuk arah X dan Z	104
Gambar 6-3 Respons Spektrum.....	105
Gambar 7-1 Prinsip analisis dinamik (time history analysis) .....	114
Gambar 7-2 Data gempa yang tercatat accelelogram dan gempa hasil simulasi (modifikasi).....	117
Gambar 7-3 Sistem SDOF akibat gerakan dasar permukaan (F.Naeim. <i>The Seismic Design Handbook</i> . 2 <sup>nd</sup> ed.....	120
Gambar 7-4 Osilator sederhana dengan redaman viscous.....	122
Gambar 7-5 Persamaan fungsi beban linear umum .....	123
Gambar 7-6 Pemodelan Struktur menjadi SDOF dan MDOF .....	129
Gambar 7-7 Bangunan geser 3 lantai.....	130
Gambar 7-8 Model Matematis dari Bangunan Geser 3 Lantai .....	130
Gambar 8-1 Kurva Kapasitas.....	140
Gambar 8-2 Kurva Kapasitas.....	145
Gambar 8-3 Prinsip analisis statik nonlinier (pushover analysis) .....	146
Gambar 8-4 Contoh response spektrum (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan.....	147
Gambar 8-5 Plot Acceleration Displacement Respon Spektra .....	149
Gambar 8-6 Single-IDA Curve .....	154
Gambar 8-7 Multi-IDA Curve.....	155

## *Daftar Tabel*

Tabel 1.1 Asesmen untuk mata kuliah Rekayasa Gempa .....	3
Tabel 2.1 Beberapa gempa besar yang terjadi di dunia .....	21



# *Bab 1*

## *Pengantar Mulaiah Rekayasa Gempa*

### **1.1. Umum**

**R**ekayasa Gempa adalah salah satu mata kuliah wajib yang harus dipelajari oleh mahasiswa departemen teknik sipil, khususnya mahasiswa Departemen Teknik Sipil Universitas Andalas, Padang. Mata kuliah ini berada di semester 6 atau di semester awal tingkat tiga.

Pada mulanya, mata kuliah ini hanyalah sebuah mata kuliah pilihan bagi mahasiswa, namun mengingat sangat rentannya Indonesia umumnya dan Sumatera Barat khususnya terhadap bahaya gempa, maka mata kuliah ini menjadi mata kuliah wajib. Seperti pameo yang sering terdengar bahwa *earthquake did not kill, bad structures did*, sudah seharusnya sarjana lulusan teknik sipil memiliki kemampuan dan kapasitas yang baik dalam memperhitungkan, merencanakan dan menganalisis beban struktur, termasuk beban gempa.

### **1.2. Deskripsi Mata Kuliah**

Pada mata kuliah ini mahasiswa belajar tentang bagaimana proses merancang suatu proyek yang meliputi; pengenalan tentang proses terjadinya gempa, cara perambatannya, dan

cara pengukuran besaran gempa. Konsep perencanaan bangunan akibat gempa meliputi gempa statik dan juga gempa dinamis sesuai dengan SNI yang berlaku. Aplikasi dengan software juga diberikan untuk mempermudah mahasiswa dalam proses perhitungannya.

Agar dapat mengikuti perkuliahan ini dengan baik, mahasiswa harus sudah mengambil mata kuliah Mekanika Getaran, mata kuliah disain baik beton maupun baja, dan juga Mata Kuliah Mekanika Rekayasa 4.

Adapun Capaian Pembelajaran Mata Kuliah (CPMK) yang diharapkan dari mata kuliah ini adalah:

1. Mahasiswa mampu menjelaskan tentang apa itu gempa serta proses terjadinya, jenis-jenis gelombang gempa, lokasi pusat gempa dan mengukur besaran gempa.
2. Mahasiswa mampu menjelaskan tentang konsep disain struktur tahan gempa.
3. Mahasiswa mampu menghitung dan mendisain respon spectra di berbagai wilayah dan kondisi di Indonesia.
4. Mahasiswa mampu memahami, menghitung, dan menganalisis pembebanan gempa dengan metode statik ekuivalen.
5. Mahasiswa mampu memahami proses pembebanan gempa dengan metode respon spectra.
6. Mahasiswa mampu memahami proses pembebanan gempa dengan metode analisis riwayat waktu.

### **1.3. Metode Pengajaran dan Penilaian**

Pembelajaran Berbasis Proyek (Project Based Learning; PjBL) adalah metode pembelajaran yang menggunakan proyek/kegiatan sebagai media. Peserta didik melakukan eksplorasi, penilaian, interpretasi, sintesis, dan informasi untuk menghasilkan berbagai bentuk hasil belajar.

Tabel 1.1 Asesmen untuk mata kuliah Rekayasa Gempa

Capaian Pembelajaran	Bentuk Asesmen						
	Laporan proposal proyek	Laporan kemajuan proyek	Laporan akhir proyek	Hasil proyek	Presentasi proyek	Kerja Tim	Total
Mahasiswa mampu menjelaskan tentang apa itu gempa serta proses terjadinya, jenis-jenis gelombang gempa, lokasi pusat gempa dan mengukur besaran gempa CP-1	5%						5%
Mahasiswa mampu menjelaskan tentang konsep disain struktur tahan gempa CP-2		5%					5%
Mahasiswa mampu menghitung dan mendisain respon spektra di berbagai wilayah dan kondisi di Indonesia CP-3		5%				5%	10%
Mahasiswa mampu memahami, menghitung, dan menganalisis pembebanan gempa dengan metode statik ekuivalen CP-4		5%	5%	5%		5%	20%
Mahasiswa mampu memahami, proses pembebanan gempa dengan analisis respon spectra CP-5		5%	5%	5%		5%	20%
Mahasiswa mampu memahami, proses pembebanan gempa dengan analisis riwayat waktu CP-6		5%	5%	5%	20%	5%	40%
TOTAL Prosentase	5%	25%	15%	15%	20%	20%	100%

#### 1.4. Panduan Pemakaian Buku oleh Dosen

Buku ini dirancang dengan teori yang berasal dari referensi dan standar peraturan kegempaan Indonesia. Oleh karenanya, akan sangat baik untuk menyediakan standar peraturan terkait ketika menerangkan materi sehingga penggunaan buku akan lebih terarah dan berintegrasi. Dosen perlu menyelaraskan isi buku dengan peraturan SNI

1726:2019 atau yang lainnya sehingga penjelasan menjadi lebih jelas. Selain itu, dosen hendaknya memberikan tugas kelompok untuk materi materi terkait sehingga mahasiswa dapat berdiskusi dengan sesama mereka. Adanya kuis dan latihan akan sangat membantu sekali.

### **1.5. Panduan Pemakaian Buku oleh Mahasiswa**

Mahasiswa akan mendapatkan pemahaman yang lebih baik dengan mengerjakan kembali contoh soal yang diberikan, kemudian melanjutkan dengan menjawab soal soal latihan yang diberikan. Penguasaan mahasiswa akan software analisis struktur pastinya akan membantu sekali untuk pemahaman mata kuliah ini. Mahasiswa juga harus sudah memiliki buku SNI 1726:2019 sehingga materi dapat dikuasai dengan lebih baik. Sebaiknya dibuat tim tim kelompok kecil sehingga sesama mahasiswa dapat mendiskusikan materi materi yang dianggap sulit.

## *Bab 2*

# *Mengenal Gempa Bumi*

### **2.1. Capaian Pembelajaran**

**M**engenal gempa bumi adalah dasar dari mahasiswa untuk dapat memahami apa itu gempa bumi, bagaimana proses terjadinya, dan apa efek yang akan terjadi pada struktur apabila gempa bumi terjadi. Dari pembelajaran ini, mahasiswa diharapkan mampu menjelaskan kembali pengertian dari gempa bumi sampai kepada efek turunan dari kejadian gempa bumi ini. Pada rangkaian Capaian Pembelajaran Mata Kuliah (CPMK), ini merupakan CPMK 1 yaitu mahasiswa mampu menjelaskan tentang apa itu gempa serta proses terjadinya, jenis-jenis gelombang gempa, lokasi pusat gempa dan mengukur besaran gempa.

### **2.2. Relevansi**

Ada keterkaitan yang sangat besar dari pemahaman tentang gempa bumi ini dengan efek yang timbul pada struktur. Bagaimana rambatan gelombang menghasilkan gaya yang akan mempengaruhi struktur akan mudah dimengerti apabila definisi tentang gempa bumi ini sudah dikuasai mahasiswa.

Pada pembelajaran ini juga dijelaskan tentang peraturan peraturan yang telah diterbitkan dan digunakan untuk struktur tahan gempa di Indonesia.

### **2.3. Pengantar Gempa Bumi**

Bumi terdiri dari beberapa lapisan yaitu lapisan permukaan bumi, selimut bumi, inti bagian dalam dan bagian luar. Lapisan lithosphere setebal kurang lebih (50-100) km adalah bagian dari lapisan permukaan dan lapisan selimut bumi bagian atas, dan merupakan lapisan batuan sangat padat. Di atas lapisan lithosphere ini terdapat benua (continent) dan lautan (ocean). Di bawah lapisan lithosphere terdapat lapisan asthenosphere yang merupakan lapisan batuan kurang padat. Lapisan ini mengelilingi lapisan mantle. Lapisan lithosphere bumi patah menjadi lebih kurang dua puluh keping bagian yang disebut pelat tektonik (plate tectonic). Pelat-pelat tektonik ini mengambang di atas lapisan asthenosphere, dan secara perlahan bergerak. Secara periodik beberapa pelat akan saling berbenturan satu dengan yang lainnya, dan dapat menyebabkan patahan pada permukaan bumi. Tumbukan antara pelat dapat memicu timbulnya gempa.

Gempa bumi adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan terjadinya slip secara tiba-tiba pada suatu patahan dan guncangan tanah yang diakibatkannya serta energi seismik yang terpancar yang disebabkan oleh slip tersebut, atau oleh aktivitas gunung berapi atau magmatik, atau perubahan tegangan mendadak lainnya di bumi.

Di seluruh dunia, lebih dari satu juta gempa bumi terjadi setiap tahunnya, atau rata-rata terjadi dua kali dalam satu menit. Gempa bumi besar di wilayah perkotaan merupakan salah satu bencana alam terburuk yang bisa terjadi. Selama empat dekade terakhir (1970-2017), gempa bumi telah menyebabkan lebih dari satu juta kematian di seluruh dunia

di Armenia, Tiongkok, Ekuador, Guatemala, Haiti, Iran, India, India, Jepang, Meksiko, Pakistan, Peru, dan Turki.

Urbanisasi yang berlebihan di berbagai belahan dunia yang aktif secara seismik telah memunculkan kota-kota besar dengan kepadatan penduduk 20.000 hingga 60.000 jiwa per kilometer persegi. Kota-kota tersebut sangat rentan terhadap bahaya gempa bumi, yang mencakup tingginya angka kematian karena trauma, sesak napas, hipotermia, dan gangguan pernapasan akut, serta patah tulang dan cedera lain yang disebabkan oleh rusaknya infrastruktur.

Gempa dapat didefinisikan sebagai getaran bumi yang terasa di permukaan, karena pelepasan energi yang cepat sebagai akibat dari pergeseran tanah pada lapisan kerak bumi.

Berdasarkan penyebabnya, gempa bumi dapat dikelompokkan ke dalam lima kategori, yaitu:

- a. Gempa tektonik: getaran akibat pergerakan pada lempeng bumi atau daerah patahan (sesar).
- b. Gempa vulkanik: getaran akibat pergerakan magma gunung berapi.
- c. Gempa tanah runtuh: getaran akibat reruntuhan gua di bawah tanah.
- d. Gempa meteorik: akibat benda angkasa (meteor) jatuh di muka bumi.
- e. Gempa akibat aktivitas manusia: misalnya akibat penggunaan bahan peledak dalam kegiatan penambangan.

Wilayah Indonesia, secara geologis, merupakan pertemuan empat lempeng utama lapisan lithosphere, yaitu lempeng Pasifik, India-Australia, Eurasia, dan lempeng Lautan Philipina seperti terlihat pada Gambar 5. Selain itu, Indonesia juga menjadi daerah bertemunya dua jalur gempa, yaitu Circum Pasific Earthquake Belt dan Trans Asiatic Earthquake Belt. Karena tingginya aktifitas seismik dan vulkanik,

kepulauan Indonesia termasuk salah satu wilayah di dunia dengan tingkat resiko gempa yang cukup tinggi.

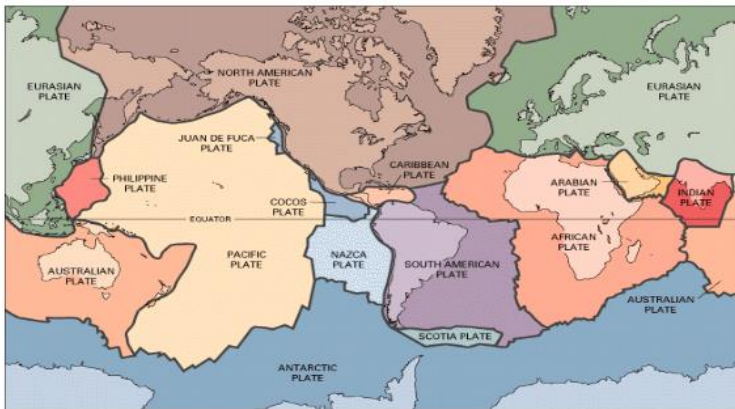
Jika gempa vulkanik terjadi akibat aktifitas gunung berapi, maka gempa tektonik terjadi akibat benturan antara pelat-pelat tektonik yang terdapat pada lapisan luar dari bumi. Menurut teori pelat tektonik, lapisan terluar dari bumi terdiri dari pelat-pelat batuan yang saling bergerak relatif satu dengan yang lainnya. Teori ini diformulasikan pada awal 1960, dan merupakan suatu penemuan yang baru di bidang geologi. Dengan menggunakan teori ini, para ilmuwan dapat secara ilmiah menjelaskan beberapa fenomena geologi seperti letusan gunung berapi, mekanisme terjadinya gempa, terbentuknya pegunungan, serta formasi dari lautan dan benua.



Gambar 2.1 Lempeng tektonik di Indonesia

Teori pelat tektonik dikembangkan dari teori yang diusulkan oleh ilmuwan Jerman Alfred Wegener pada 1921. Dengan melihat bentuk dari benua-benua yang ada sekarang ini dan dengan bukti-bukti geologi yang ditemukan di setiap benua, ia mengembangkan suatu teori mengenai benua yang lepas (continental drift). Para ahli geologi pada 1960 menemukan

bukti yang mendukung ide dari pelat tektonik dan pergerakannya. Mereka menggunakan teori dari Wegener pada berbagai aspek dari perubahan bumi, dan menggunakan bukti-bukti ini untuk memperkuat teori mengenai benua yang lepas. Pada 1968 para ilmuwan menggabungkan banyak kejadian geologi pada suatu teori yang disebut Global Tektonik Baru (New Global Tectonics) atau lebih dikenal dengan nama Pelat Tektonik. Saat ini terdapat tujuh buah pelat tektonik yang besar dan beberapa pelat yang berukuran lebih kecil. Beberapa pelat yang besar meliputi pelat Pasific, pelat North American, pelat Eurasian, pelat Antartica, dan pelat Africa. Pelat yang lebih kecil terdiri dari pelat Cocos, pelat Nazca, pelat Caribean, pelat Philippine.



Gambar 2.2 Pelat tektonik di dunia.

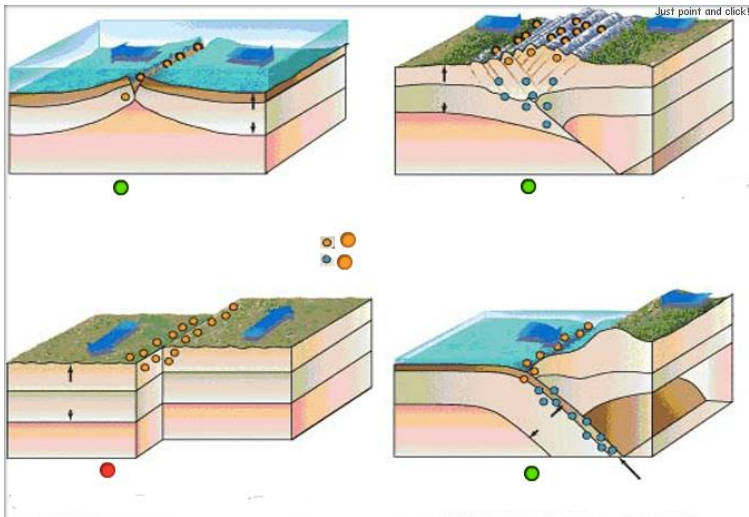
Pada perbatasan atau pertemuan antara pelat-pelat tektonik, dapat terjadi beberapa proses geologi yaitu :

- Subduction, yaitu pelat tektonik yang satu bergerak membelok ke bawah, sedangkan pelat yang lain sedikit terangkat.
- Extrusion, yaitu kedua pelat tektonik saling bergerak ke atas kemudian saling menjauh.

- Intrusion, yaitu kedua pelat tektonik saling mendekat kemudian bergerak ke bawah
- Trancursion, yaitu pelat tektonik yang satu bergerak vertikal atau horisontal terhadap pelat yang lainnya.

Ada tiga kemungkinan pergerakan yang dapat terjadi antara satu pelat tektonik relatif terhadap pelat lainnya, yaitu :

- Spreading, jika kedua pelat tektonik bergerak saling menjauhi.
- Collision, jika kedua pelat tektonik bergerak saling mendekati.
- Transform, jika kedua pelat tektonik bergerak saling menggeser.



Gambar 2.3 Pola pergerakan lempeng.

Jika dua buah pelat tektonik bertemu pada suatu daerah sesar atau patahan (fault), keduanya dapat bergerak saling menjauhi, saling mendekati atau saling bergeser. Umumnya gerakan dari pelat tektonik ini berlangsung sangat lambat dan tidak dapat dirasakan oleh manusia, namun terukur

sebesar sampai 15 cm pertahun. Kadang-kadang gerakan pelat tektonik macet dan saling mengunci, sehingga terjadi pengumpulan energi yang berlangsung terus sampai pada suatu saat batuan pada pelat tektonik tersebut tidak mampu lagi menahan gerakan tersebut, sehingga terjadi pelepasan energi regangan secara mendadak. Mekanisme pelepasan energi regangan ini yang kita kenal sebagai pemicu terjadinya gempa tektonik.

Gempa dapat terjadi kapan saja, tanpa mengenal musim. Meskipun demikian, konsentrasi gempa cenderung terjadi di tempat-tempat tertentu saja, seperti di daerah pertemuan antara dua pelat tektonik. Gempa dapat terjadi dimanapun di bumi ini, tetapi pada umumnya banyak terjadi di sekitar perbatasan antara pelat-pelat tektonik

Perbandingan jumlah kerugian akibat gempa bumi dengan bencana alam lainnya dapat bervariasi tergantung pada berbagai faktor, termasuk magnitudo gempa, lokasi geografis, tingkat kesiapan masyarakat, dan jenis bencana alam lainnya. Namun, secara umum, gempa bumi dapat menyebabkan kerugian yang signifikan, terutama jika terjadi di daerah padat penduduk atau jika diikuti oleh bencana tambahan seperti tsunami atau letusan gunung berapi. Gempa bumi sering kali dapat menyebabkan kerusakan struktural pada bangunan, jembatan, dan jalan raya. Kerugian ini dapat melibatkan biaya perbaikan yang besar.





Gambar 2.5 Notasi gempa bumi.

Gempa bumi dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa faktor yang meliputi sumber gempa, magnitudo, dan kedalaman. Berikut adalah beberapa klasifikasi umum untuk gempa bumi:

Berdasarkan Sumber Gempa:

1. Gempa tektonik: Gempa yang terjadi akibat pergerakan lempeng tektonik di dalam kerak bumi. Ini adalah jenis gempa bumi yang paling umum.
2. Gempa vulkanik: Gempa yang terjadi akibat aktivitas vulkanik, seperti erupsi gunung berapi atau pergerakan magma di bawah permukaan.
3. Gempa amblesan (slip): Gempa yang terjadi akibat pergeseran vertikal pada sesar atau retakan di kerak bumi.

Berdasarkan Magnitudo:

1. Gempa mikro: Gempa dengan magnitudo kurang dari 2,0, yang sering kali tidak terdeteksi oleh manusia tetapi dapat diukur oleh seismograf.
2. Gempa kecil: Gempa dengan magnitudo antara 2,0 hingga 4,9. Meskipun dapat dirasakan oleh manusia, biasanya tidak menimbulkan kerusakan yang signifikan.
3. Gempa sedang: Gempa dengan magnitudo antara 5,0 hingga 5,9. Gempa ini dapat menyebabkan kerusakan pada bangunan dan infrastruktur dalam skala lokal.
4. Gempa besar: Gempa dengan magnitudo antara 6,0 hingga 6,9. Gempa ini dapat menyebabkan kerusakan yang signifikan dalam radius yang lebih luas.
5. Gempa besar sekali: Gempa dengan magnitudo antara 7,0 hingga 7,9. Gempa ini dapat menyebabkan kerusakan parah dan bahkan menimbulkan ancaman tsunami.
6. Gempa hebat: Gempa dengan magnitudo 8,0 atau lebih. Gempa ini sangat langka dan dapat menyebabkan kerusakan yang luas, bahkan di daerah yang jauh dari episenter.

Berdasarkan Kedalaman:

1. Gempa dangkal: Gempa yang terjadi pada kedalaman kurang dari 70 kilometer di bawah permukaan.
2. Gempa menengah: Gempa yang terjadi pada kedalaman antara 70 hingga 300 kilometer di bawah permukaan.
3. Gempa dalam: Gempa yang terjadi pada kedalaman lebih dari 300 kilometer di bawah permukaan.

Penting untuk dicatat bahwa klasifikasi ini dapat saling terkait dan terjadi dalam berbagai kombinasi. Misalnya, gempa bumi tektonik dapat memiliki magnitudo yang berbeda dan terjadi pada kedalaman yang berbeda pula. Klasifikasi ini membantu ilmuwan dan ahli gempa untuk

memahami karakteristik dan pola gempa bumi serta mempersiapkan langkah-langkah mitigasi yang diperlukan.

#### **2.4. Jenis Gelombang Gempa**

Gelombang seismik adalah strain dinamik atau strain elastik yang berubah terhadap waktu yang merambat melalui material elastik seperti batuan sebagai tanggapan terhadap suatu gangguan dinamik. Gelombang seismik atau gelombang elastik terdiri atas dua jenis, yaitu gelombang tubuh (body wave) dan gelombang permukaan (surface wave).

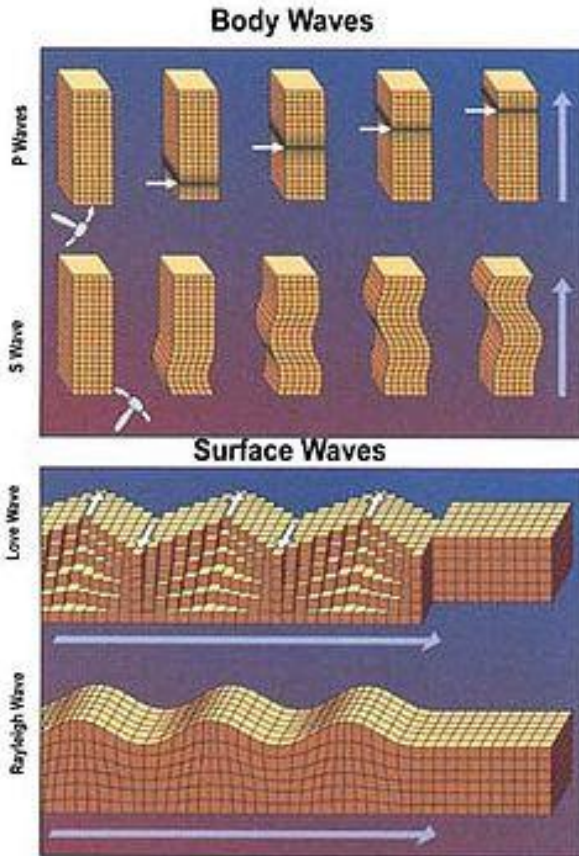
Metode seismik memanfaatkan penjalaran gelombang seismik ke dalam bumi. Yang menjadi objek perhatian utama pada rekaman gelombang seismik dalam metode ini ialah body wave. Gelombang ini merupakan gelombang yang energinya ditransfer melalui medium di dalam bumi. Sedangkan pada surface wave transfer energinya pada permukaan bebas, tidak terjadi penetrasi ke dalam medium bumi dan hanya merambat di permukaan bumi saja.

Body wave dibagi menjadi dua macam, yaitu:

P-wave atau gelombang-P/gelombang primer. Gelombang ini adalah gelombang longitudinal dimana arah pergerakan partikel akan searah dengan arah rambat gelombang.

S-wave atau gelombang-S/gelombang sekunder. Gelombang ini adalah gelombang transversal dimana arah pergerakan partikel akan tegak lurus dengan arah rambat gelombang.

Kecepatan gelombang-P lebih besar daripada gelombang-S (jika merambat dalam medium yang sama). Gelombang-P merupakan gelombang yang pertama kali sampai dan terdeteksi oleh receiver (hydrophone atau geophone). Sedangkan gelombang-S kadang tidak terdeteksi oleh receiver untuk jarak yang dekat dengan sumber.



Gambar 2.6 Gelombang Badan dan Gelombang Permukaan

## 2.5. Mengukur Kekuatan Gempa Bumi

Di seluruh dunia, gempa dapat terjadi ratusan kali setiap harinya. Suatu jaringan alat seismograph (alat untuk mencatat pergerakan tanah akibat gempa) yang terpasang di seluruh dunia, mendeteksi sekitar 1 juta gempa ringan terjadi setiap tahunnya. Gempa sangat kuat (great earthquake) seperti yang terjadi pada 1964 di Alaska yang

mengakibatkan kerugian jutaan dollar, terjadi sekali dalam beberapa tahun. Gempa-gempa kuat (major earthquake) seperti yang terjadi di Loma Prieta, California pada 1989 dan di Kobe, Jepang pada 1995, dapat terjadi 20 kali setiap tahunnya. Gempa kuat juga dapat menyebabkan banyak kerugian materi dan korban jiwa.

Kekuatan gempa bumi diukur menggunakan skala magnitudo dan skala intensitas. Skala magnitudo mengukur seberapa besar energi yang dilepaskan oleh gempa bumi. Semakin tinggi nilai magnitudo, semakin besar kekuatan gempa. Skala ini menggunakan nilai numerik, di mana setiap peningkatan satu poin pada skala magnitudo berarti gempa itu 10 kali lebih kuat secara energi. Misalnya, gempa magnitudo 6,0 adalah 10 kali lebih kuat daripada gempa magnitudo 5,0. Skala magnitudo memberikan gambaran tentang kekuatan absolut gempa, tetapi tidak memberikan informasi tentang dampak gempa di permukaan bumi.

Sedangkan skala intensitas mengukur dampak gempa pada manusia, struktur bangunan, dan lingkungan. Ini mencerminkan sejauh mana guncangan dirasakan oleh orang-orang dan seberapa besar kerusakan yang terjadi. Skala intensitas biasanya menggunakan skala Mercalli, yang diberi label dari I (dirasakan oleh sebagian kecil orang) hingga XII (kerusakan total). Dua gempa dengan magnitudo yang sama bisa memiliki tingkat intensitas yang berbeda tergantung pada kedalaman gempa, jarak dari pusat gempa, jenis tanah di daerah tersebut, dan faktor-faktor lainnya.

Untuk mengukur kekuatan gempa bumi secara akurat, stasiun seismik di seluruh dunia menggunakan seismograf untuk merekam getaran bumi. Data ini kemudian diolah untuk menentukan magnitudo gempa dan, jika mungkin, memperkirakan intensitasnya. Sistem peringatan dini juga menggunakan informasi ini untuk memberi peringatan sejak dini tentang potensi gempa bumi yang akan

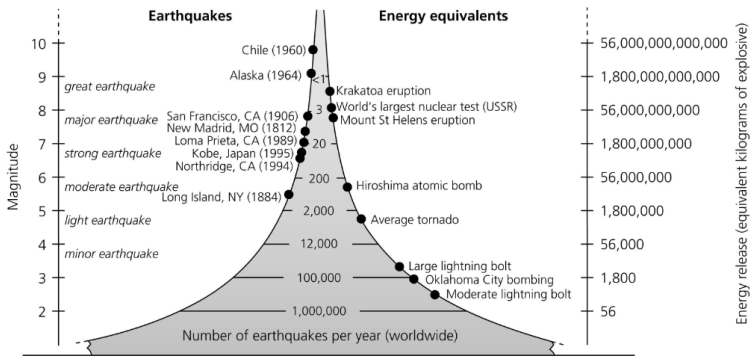
terjadi. Magnitudo gempa adalah perhitungan matematis kuantitatif untuk mengukur energi yang dilepaskan pada sumber gempa. Di sisi lain, intensitas gempa adalah pengukuran kualitatif kekuatan guncangan yang dihasilkan oleh gempa bumi. Skala magnitudo menggambarkan secara numerik besar kecilnya gempa menggunakan persamaan matematis dan karakteristik gelombang seismik yang terekam pada seismograf.

Sebelum pengembangan dan penggunaan seismograf, sekitar tahun 1900, para ilmuwan hanya dapat memperkirakan besaran gempa, berdasarkan laporan sejarah mengenai tingkat dan tingkat keparahan kerusakan.

Penentuan besaran gempa umumnya melibatkan identifikasi jenis gelombang seismik tertentu pada seismogram dan kemudian mengukur satu atau lebih karakteristik gelombang, seperti waktu, orientasi, amplitudo, frekuensi, atau durasi. Penyesuaian tambahan biasanya dilakukan pada jarak, jenis kerak, dan karakteristik seismograf yang merekam seismogram.

Berbagai skala besaran mewakili berbagai cara untuk memperoleh besaran dari informasi yang tersedia. Semua skala besaran mempertahankan skala logaritmik seperti yang dirancang oleh Charles Richter, dan disesuaikan sehingga rentang menengah kira-kira berkorelasi dengan skala "Richter" asli. Magnitudo Richter, atau skala magnitudo lokal, adalah skala pertama untuk mengukur gempa bumi. Ini dikembangkan pada tahun 1935 oleh Charles F. Richter. Richter menetapkan dua fitur yang sekarang umum untuk semua skala magnitudo.

Bila dibandingkan dengan lepasan energi dari ledakan bom, gambar di bawah ini dapat menjelaskannya.



Gambar 0-7 Perbandingan lepasan energi dari ledakan dengan magnitude gempa bumi (sumber: Bravo and Ortiz (2005); Andrea et al. (2011))

Besaran Momen (MW atau Mw) adalah ukuran besaran gempa bumi berdasarkan momen seismiknya (energi yang dilepaskan). Nilai numeriknya mirip dengan besaran Skala Richter asli.

Skala intensitas Mercalli yang dimodifikasi (MM atau MMI), diturunkan dari skala intensitas Mercalli Giuseppe Mercalli tahun 1902, adalah skala intensitas seismik yang digunakan untuk mengukur intensitas guncangan yang diakibatkan oleh gempa bumi. Skala ini umumnya digunakan oleh sebagian besar negara dan lembaga seismologi di seluruh dunia [1].

## 2.6. Gempa Bumi Besar dalam Sejarah

Gempa bumi besar dalam sejarah mencakup peristiwa gempa bumi yang memiliki dampak besar baik dari segi kerusakan fisik maupun sosial. Sejarah sering kali mencatat peristiwa dramatis yang mempengaruhi masyarakat dan lingkungan sekitarnya Berikut adalah beberapa gempa bumi besar yang memiliki dampak signifikan dalam sejarah:

- Gempa Bumi Tangshan (1976)

Pada tanggal 28 Juli 1976, gempa bumi dahsyat dengan kekuatan 7,5 skala Richter mengguncang kota Tangshan di Provinsi Hebei, Tiongkok. Gempa ini menewaskan sekitar 242.000 orang dan menjadi salah satu bencana alam paling mematikan dalam sejarah modern.

- Gempa Bumi Lisabon (1755)

Terjadi pada 1 November 1755 di lepas pantai Lisabon, Portugal. Gempa ini disertai tsunami dan kebakaran besar, menghancurkan sebagian besar kota Lisabon. Kejadian ini memicu perubahan signifikan dalam pemikiran filosofis dan ilmiah pada masa itu.

- Gempa Bumi San Francisco (1906)

Gempa ini terjadi pada 18 April 1906 di California, Amerika Serikat. Kejadiannya diikuti oleh kebakaran besar yang melibatkan sebagian besar kota San Francisco. Gempa ini menyebabkan kerusakan yang parah dan perubahan signifikan dalam perencanaan kota.

- Gempa Bumi Indian Ocean (2004)

Terjadi pada 26 Desember 2004, gempa ini memiliki kekuatan besar dan memicu tsunami yang melanda sejumlah negara di sekitar Samudra Hindia. Tsunami ini menjadi salah satu bencana alam paling mematikan dalam sejarah, menewaskan ratusan ribu orang.

- Gempa Bumi Tohoku (2011)

Gempa bumi berkekuatan 9,0 skala Richter yang terjadi di lepas pantai timur Jepang pada tanggal 11 Maret 2011, memicu tsunami dahsyat. Tsunami tersebut menghantam pesisir dan menyebabkan kerusakan parah pada pembangkit listrik nuklir Fukushima. Gempa ini menewaskan ribuan orang dan menyebabkan kehancuran besar.

- Gempa Bumi Lombok (2018)

Pada tahun 2018, pulau Lombok di Indonesia mengalami serangkaian gempa bumi yang mengakibatkan kerusakan signifikan. Gempa terbesar terjadi pada tanggal 5 Agustus 2018, dengan kekuatan 7,0 skala Richter. Guncangan tersebut menyebabkan korban jiwa, ribuan orang terluka, dan merusak banyak bangunan. Peristiwa-peristiwa ini mencerminkan kekuatan alam yang luar biasa dan mengingatkan kita akan pentingnya persiapan dan mitigasi bencana untuk melindungi masyarakat dan infrastruktur dari dampak gempa bumi besar.

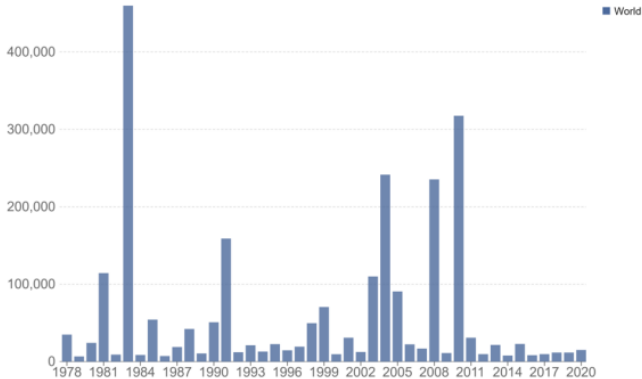
Tabel 2.1 Beberapa gempa besar yang terjadi di dunia

<b>Tanggal</b>	<b>Lokasi</b>	<b>Magnitudo</b>
22 Mei 1960	Valdivia, Chile	9.4 - 9.6
27 Maret 1964	Prince William Sound, Alaska	9.2
26 Desember 2024	Samudra Hindia, Sumatera, Indonesia	9.1
11 Maret 2011	Samudra Pasifik, Tohoku, Jepang	9.1
8 Juli 1730	Valparaiso, Chile	9.1 - 9.3 (perkiraan)
4 November 1952	Kamchatka, Rusia	9
13 Agustus 1868	Arica, Chile	8.5 - 9 (perkiraan)
26 Januari 1700	Pantai Pasifik, British Columbia	8.7 - 9.2 (perkiraan)
2 April 1762	Chittagong, Bangladesh	8.8 (perkiraan)
25 November 1833	Sumatera, Indonesia	8.8 (perkiraan)

Berikut besarnya jumlah korban jiwa akibat gempa bumi dari data 2017.

## Number of deaths from disasters

Disasters include all geophysical, meteorological and climate events including earthquakes, volcanic activity, landslides, drought, wildfires, storms, and flooding.



Source: Our World in Data based on EM-DAT, CRED / UCLouvain, Brussels, Belgium – [www.emdat.be](http://www.emdat.be) (D. Guha-Sapir)

CC BY

Gambar 2.8 Besarnya kerugian jiwa akibat bencana alam termasuk gempa bumi (sumber: <https://ourworldindata.org/>)

## 2.7. Keruntuhan Infrastruktur akibat Gempa Bumi

Kerusakan yang dapat ditimbulkan gempa tergantung dari besar (magnitude) dan lamanya gempa, atau banyaknya getaran yang terjadi. Desain struktur dan material yang digunakan untuk konstruksi bangunan, juga akan berpengaruh terhadap intensitas kerusakan yang terjadi. Tingkat kekuatan gempa bervariasi mulai dari getaran yang ringan, sedang, sampai getaran kuat yang dapat dirasakan sampai ribuan kilometer. Gempa dapat menyebabkan perubahan bentuk dari permukaan bumi, menyebabkan runtuhnya struktur bangunan, atau menyebabkan terjadinya gelombang pasang yang besar (tsunami). Akibat kerusakan yang ditimbulkan oleh gempa akan menyebabkan jatuhnya korban jiwa dan kerugian harta benda dalam jumlah yang banyak.

Dalam 500 tahun terakhir, gempa telah menyebabkan jutaan korban jiwa di seluruh dunia, termasuk 240000 korban saat terjadi gempa Tang-Shan di Cina pada 1976. Gempa juga mengakibatkan kerugian properti dan kerusakan struktur. Persiapan-persiapan yang memadai seperti pendidikan atau sosialisasai mengenai bahaya gempa, perancangan keselamatan saat terjadi gempa, perkuatan struktur bangunan yang sudah berdiri dan desain struktur bangunan tahan gempa, dapat mengurangi jumlah korban jiwa dan kerusakan infrastruktur yang disebabkan oleh gempa.

Gempa kuat dapat memiliki efek serius terhadap bangunan, tergantung pada sejumlah faktor, termasuk intensitas gempa, jarak dari pusat gempa, serta desain dan kualitas konstruksi bangunan itu sendiri. Beberapa efek umum yang dapat terjadi pada bangunan akibat gempa kuat melibatkan:

1. Retakan Struktural:  
Gempa dapat menyebabkan retakan pada dinding, lantai, dan langit-langit bangunan. Retakan ini dapat muncul di area yang lemah atau pada sambungan struktural.
2. Geser Struktural:  
Gempa yang kuat dapat menyebabkan pergeseran atau pemindahan struktural. Ini dapat merusak fondasi atau menyebabkan geser pada elemen struktural, seperti kolom atau balok.
3. Runtuhan Bangunan:  
Bangunan yang tidak dirancang atau dibangun dengan baik dapat mengalami keruntuhan total atau sebagian akibat gempa bumi yang kuat.
4. Kerusakan Non-Struktural:  
Selain kerusakan struktural, gempa dapat merusak elemen non-struktural seperti kaca, panel dinding, dan perabotan. Ini dapat menciptakan bahaya tambahan bagi penghuni bangunan.

5. Kerusakan pada Sistem Utilitas:  
Gempa dapat merusak sistem utilitas seperti gas, air, dan listrik. Ini dapat menyebabkan kebocoran gas, kerusakan pipa air, atau pemadaman listrik.
6. Longsor dan Pemadaman Jalan:  
Gempa bumi dapat menyebabkan longsor tanah atau penutupan jalan, menghambat upaya penyelamatan dan evakuasi.
7. Tsunami:  
Jika pusat gempa berada di bawah laut, gempa bisa menyebabkan tsunami. Tsunami dapat merusak pantai dan daerah pesisir, termasuk bangunan di sana.
8. Efek Pascatrauma:  
Bangunan yang selamat dari gempa sering mengalami kerusakan psikologis bagi penghuninya. Kondisi ini dapat mencakup kekhawatiran akan gempa susulan, kehilangan harta benda, atau trauma secara umum.
9. Kerusakan Infrastruktur Lainnya:  
Gempa bisa merusak jembatan, terowongan, tanggul, dan infrastruktur lainnya, menyebabkan kehancuran atau isolasi wilayah tertentu.

Di Indonesia, peraturan kegempaan melibatkan beberapa pihak dan terdiri dari berbagai aspek untuk memastikan kesiapan dan penanggulangan terhadap potensi dampak gempa. Beberapa poin kunci dalam peraturan kegempaan di Indonesia melibatkan:

- a. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG): BMKG merupakan lembaga pemerintah yang bertanggung jawab atas pemantauan gempa bumi dan penyediaan informasi gempa bumi di Indonesia. Mereka memiliki peran penting dalam

- memberikan peringatan dini dan informasi terkait gempa.
- b. Peraturan Bangunan Tahan Gempa: Pemerintah Indonesia memiliki peraturan yang menetapkan standar desain bangunan tahan gempa. Ini mencakup ketentuan mengenai bahan bangunan, struktur, dan teknologi bangunan untuk memastikan keamanan bangunan selama gempa.
  - c. Peraturan Daerah: Beberapa daerah di Indonesia mungkin memiliki peraturan daerah terkait penanganan gempa bumi yang lebih spesifik sesuai dengan karakteristik geologis dan topografi setempat.
  - d. Penyuluhan dan Pelatihan Masyarakat: Pemerintah dan lembaga terkait melakukan program penyuluhan dan pelatihan kepada masyarakat agar lebih siap menghadapi gempa bumi. Ini mencakup langkah-langkah evakuasi, pertolongan pertama, dan langkah-langkah keselamatan lainnya.
  - e. Sistem Peringatan Dini: Peraturan juga mencakup pengembangan dan pengelolaan sistem peringatan dini untuk gempa bumi, yang dapat memberikan peringatan kepada masyarakat dan instansi terkait sebelum guncangan mencapai daerah yang terdampak.

Penting untuk dicatat bahwa peraturan dapat mengalami perubahan seiring waktu sebagai respons terhadap perubahan risiko gempa dan peningkatan pemahaman ilmiah. Kesadaran masyarakat, kesiapan, dan kerjasama antarlembaga juga berperan penting dalam mengurangi dampak gempa bumi di Indonesia.

## **2.8. Tugas dan Latihan**

Buatlah secara berkelompok paparan tentang gempa bumi dan pengaruhnya terhadap infrastruktur dan dipresentasikan di depan kelas.

# *Bab 3*

## *Konsep Disain Struktur Tahan Gempa*

### **3.1. Capaian Pembelajaran**

**M**ahasiswa dikatakan telah mencapai tujuan pembelajaran dari bab ini apabila telah memahami konsep konsep perencanaan struktur tahan gempa. Dalam rangkaian CPMK, ini tercantum pada CPMK 2 yaitu mahasiswa mampu menjelaskan tentang konsep disain struktur tahan gempa.

Konsep konsep disain tahan gempa seperti definisi bangunan tahan gempa, syarat bangunan tahan gempa, dan daktilitas, flesibilitas akan dijelaskan pada bagian ini.

### **3.2. Relevansi**

Keterkaitan antara konsep disain tahan gempa dengan mata kuliah ini tentulah sangat besar. Mahasiswa akan mampu memahami proses penentuan beban gempa pada struktur bila prinsip prinsip dasar dari bangunan tahan gempa telah dimengerti.

### **3.3. Struktur Tahan Gempa**

Manusia tidak terlepas dari kebutuhan sarana infrastruktur sebagai alat untuk mempermudahnya menjalani kehidupan yang aman dan nyaman. Ketersediaan infrastruktur merupakan prasyarat bagi terselenggaranya seluruh hajat hidup manusia. Tuntutan akan terselenggaranya

infrastruktur yang baik dan efisien semakin lama semakin tinggi, seiring dengan makin majunya pertumbuhan di berbagai sektor lainnya, seperti industri, perdagangan, pertanian dan sebagainya, katanya. Sejak dimulainya peradaban manusia, manusia telah berusaha menciptakan berbagai bentuk konstruksi untuk menciptakan kehidupan yang baik dan sejahtera bagi komunitasnya. Konstruksi sebagai proses transformasi aneka material menjadi wujud fisik bangunan yang berguna, mempunyai riwayat yang melekat dengan riwayat peradaban di berbagai penjuru dunia.

Perkembangan konstruksi, tidaklah berdiri sendiri dan tidak muncul secara mendadak, namun erat kaitannya dengan upacara keagamaan, dan kegiatan perdagangan, serta peperangan dan perdamaian yang silih berganti. Dapat dikatakan bahwa perkembangan konstruksi sejalan dengan waktu perkembangan peradaban manusia.

Kebutuhan ini menuntut manusia untuk menghasilkan infrastruktur yang aman, nyaman, indah dan melindungi manusia dari kerugian apapun. Hal ini telah disadari oleh manusia sejak beribu abad yang lalu, dengan ditemukannya manuscript Kode Hammurabi, salah satu konsep kehidupan yang tertua di muka bumi [3]. Kode Hammurabi, salah satu perangkat hukum paling awal dan paling terpelihara dari Mesopotamia kuno, tidak secara khusus membahas infrastruktur seperti yang kita pahami saat ini. Kode Hammurabi, yang ditetapkan oleh raja Babilonia Hammurabi sekitar tahun 1754 SM, mencakup berbagai masalah yang berkaitan dengan keadilan, perdagangan, dan kehidupan sehari-hari. Meskipun peraturan tersebut memuat ketentuan terkait konstruksi dan pemeliharaan, peraturan tersebut lebih fokus pada kepemilikan pribadi, tanggung jawab pembangun, dan hukuman atas kelalaian. Berikut beberapa

undang-undang dari Kode Hammurabi yang menyentuh aspek-aspek terkait konstruksi dan infrastruktur:

Hukum 229:

“Jika seorang pembangun membangun sebuah rumah untuk seseorang dan tidak kokoh pembangunannya, lalu rumah yang dibangunnya roboh dan mengakibatkan matinya pemilik rumah itu, maka pembangun itu harus dihukum mati.”

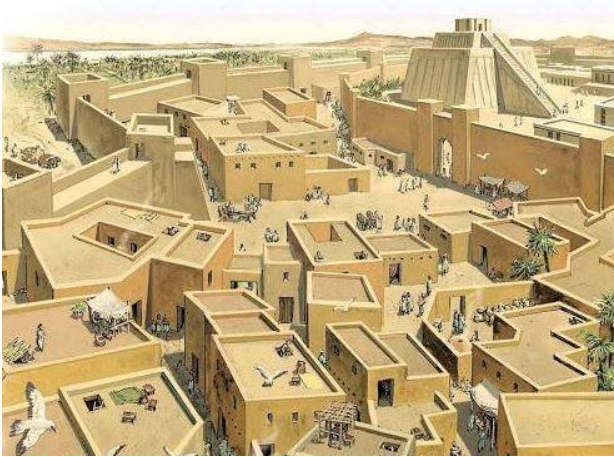
Hukum 230:

“Jika hal itu mengakibatkan matinya anak pemilik rumah, maka mereka harus membunuh salah satu anak tukang bangunan itu.”

Hukum 232:

“Jika hal itu mengakibatkan matinya seorang budak pemilik rumah, maka ia harus memberikan kepada pemilik rumah seorang budak yang nilainya sama.”

Undang-undang ini mencerminkan prinsip "lex talionis" atau "mata ganti mata" yang merupakan ciri hukum Babilonia kuno. Hal ini menunjukkan beratnya konsekuensi bagi pembangun yang kelalaiannya menyebabkan hilangnya nyawa atau harta benda. Penting untuk dicatat bahwa undang-undang dalam Kode Hammurabi terutama berkaitan dengan menjaga ketertiban dan menjamin keadilan daripada mengatur infrastruktur skala besar atau proyek publik. Sistem hukum Babilonia kuno lebih berfokus pada hak dan tanggung jawab individu dalam konteks kehidupan sehari-hari dibandingkan kerangka peraturan kompleks yang kita kaitkan dengan pembangunan infrastruktur modern.



Gambar 3.1 Konstruksi di zaman Mesopotamia

Dari Kode Hammurabi ini, dapat disadari bahwa membangun infrastruktur yang benar benar memberikan perlindungan kepada penggunanya adalah sangat penting. Oleh karena itu, si perencana harus benar benar memahami konsep konsep mendisain dan menganalisis struktur secara baik. Salah satunya adalah dengan memahami bahwa beban gempa harus menjadikan satu pertimbangan yang khusus dan sangat penting.

Struktur tahan gempa sangat penting terutama di daerah yang berisiko tinggi terhadap gempa bumi. Penerapan prinsip-prinsip desain tahan gempa akan membantu melindungi nyawa manusia, melibatkan dampak gempa bumi pada ekonomi, dan menjaga infrastruktur agar tetap berfungsi setelah terjadi gempa. Struktur tahan gempa adalah bangunan atau struktur yang dirancang dan dibangun dengan memperhitungkan potensi gempa bumi dan upaya untuk mengurangi risiko kerusakan atau kerugian akibat gempa. Tujuan utama dari struktur tahan gempa adalah untuk memberikan perlindungan terhadap gaya-gaya yang

dihasilkan oleh getaran gempa, sehingga struktur dapat tetap utuh dan aman selama atau setelah gempa bumi.

Bangunan tahan gempa adalah struktur bangunan yang dirancang dan dibangun dengan mempertimbangkan potensi gempa bumi di wilayah tersebut. Beban gempa merupakan beban yang sangat tidak dapat diperkirakan baik besarnya, arahnya, maupun saat terjadinya. Besarnya beban gempa yang bekerja pada struktur bangunan, tergantung dari banyak variabel. Gaya horisontal, gaya vertikal dan momen torsi yang terjadi akibat gempa pada struktur, sangat tergantung pada berat dan kekakuan material struktur, konfigurasi dan sistem struktur, periode atau waktu getar struktur, kondisi tanah dasar, wilayah kegempaan, serta perilaku gempa itu sendiri. Membangun struktur yang benar benar tahan terhadap gempa bumi adalah sesuatu yang absurd, karena gempa bumi merupakan pergeseran tanah di mana struktur pasti melekat atau berdiri di atasnya. Yang dapat dilakukan adalah membangun struktur yang memenuhi kaidah kaidah perencanaan menahan beban gempa yang telah diprediksi sebelumnya, atau yang disebut dengan gempa rencana.

Struktur tahan gempa harus memenuhi sejumlah kriteria untuk dapat bertahan dan berkinerja baik selama gempa bumi. Bentuk suatu bangunan dalam perencanaan bangunan tahan gempa, pada dasarnya akan mempengaruhi tingkat kesulitan dalam perencanaan atau analisa, dan perilaku struktur sewaktu dilanda gempa. Dapatlah diterima, bahwa semakin tidak teraturnya bentuk suatu bangunan semakin sulit juga perencanaannya, karena bangunan-bangunan yang bentuknya tidak teratur akan memerlukan analisa dinamis. Dari pengalaman-pengalaman yang terdahulu juga menunjukkan bahwa struktur-struktur dengan bentuk yang sederhana dan simetris mempunyai ketahanan yang paling baik terhadap gempa. Sebab hal yang paling utama adalah

dapat diperkirakan dengan lebih baik perilaku struktur dan lebih rendahnya daktilitas struktur yang dituntut bila dibandingkan dengan struktur yang mempunyai bentuk yang tidak teratur. Tetapi perlu juga diketahui bahwa, meskipun bentuk dari suatu bangunan adalah simetris tetapi belum juga menjamin bahwa perilakunya memuaskan sewaktu dilanda gempa. Hal ini dapat terjadi apabila kita tidak memperhatikan elemen-elemen struktur dalam perencanaan yang dapat mempengaruhi perilaku struktur utama menjadi buruk.

Pada perencanaan struktur bangunan tahan gempa, perlu ditinjau tiga taraf beban gempa, yaitu gempa ringan, gempa sedang, dan gempa kuat, untuk merencanakan elemen-elemen dari sistem struktur agar tetap mempunyai kinerja yang baik pada saat terjadi gempa.

#### 1. Gempa ringan

Gempa Ringan adalah gempa yang peluang atau resiko terjadinya dalam periode umur rencana bangunan 50 tahun adalah 92% ( $R_N = 92\%$ ), atau gempa yang periode ulangnya 20 tahun ( $T_R = 20$  tahun). Akibat gempa ringan, bangunan harus tetap berperilaku elastis. Ini berarti bahwa pada saat terjadi gempa, elemen-elemen struktur bangunan tidak diperbolehkan mengalami kerusakan struktural maupun kerusakan non- struktural.

#### 2. Gempa sedang

Gempa sedang adalah gempa yang peluang atau resiko terjadinya dalam periode umur rencana bangunan 50 tahun adalah 50% ( $R_N = 50\%$ ), atau gempa yang periode ulangnya adalah 75 tahun ( $T_R = 75$  tahun). Akibat gempa sedang, struktur bangunan tidak boleh mengalami kerusakan struktural, namun diperkenankan mengalami kerusakan yang bersifat non- struktural.

### 3. Gempa kuat

Gempa kuat adalah gempa yang peluang atau resiko terjadinya dalam periode umur rencana bangunan 50 tahun adalah 2% ( $R_N = 2\%$ ), atau gempa yang periode ulangnya adalah 2500 tahun ( $T_R = 2500$  tahun). Akibat gempa kuat, struktur bangunan dapat mengalami kerusakan struktural yang berat, namun struktur harus tetap berdiri dan tidak boleh runtuh sehingga korban jiwa dapat dihindarkan.

Berdasarkan konsep desain bangunan tahan gempa tersebut, struktur bangunan tahan gempa harus terbuat dari sistem struktur yang berperilaku daktail.

Daktalitas suatu struktur adalah kemampuan suatu struktur untuk mengalami simpangan pasca-elastik yang besar secara berulang kali dan bolak-balik akibat beban gempa yang menyebabkan terjadinya pelepasan pertama, sambil mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang cukup, sehingga struktur gedung tersebut tetap berdiri walaupun sudah berada dalam kondisi di ambang keruntuhan. Perilaku ini cukup penting karena saat pelepasan elemen struktur terjadi maka terjadi pula peresapan energi gempa oleh struktur. Tiap Negara mempunyai desain sendiri dalam merencanakan tingkat daktalitas untuk keamanan bangunan yang mereka bangun, hal ini tergantung dari letak geologi negara masing-masing.

Saat terjadi gempa, daktalitas akan mempertahankan kekuatan dan kekakuan pada struktur sehingga struktur gedung tetap berdiri walaupun telah berada pada ambang keruntuhan. Rasio antara simpangan maksimum struktur terhadap simpangan struktur pada saat terjadinya sendi plastis yang pertama dinyatakan sebagai faktor daktalitas ( $\mu$ ).

Struktur yang direncanakan untuk berperilaku secara elastik bila dikenai gempa yang sangat kuat (gempa maksimum) tidak akan ekonomis dalam pembuatannya. Menurut

peraturan gempa Indonesia, kriteria perencanaan bangunan tahan gempa ditujukan untuk menghasilkan kekuatan struktur adalah sebagai berikut :

1. Struktur bangunan harus direncanakan dengan kekuatan dan kekakuan yang relatif cukup untuk menahan gempa rencana kekuatan sedang, sehingga struktur hanya mengalami kerusakan ringan yang masih dapat diperbaiki.
2. Kekuatan dan kekakuan struktur yang direncanakan untuk memenuhi kondisi di atas direncanakan juga supaya cukup untuk memberikan kemampuan kepada struktur bangunan untuk melakukan deformasi (simpangan) yang bersifat elastoplastik tanpa runtuh, bila mengalami gempa rencana maksimum (struktur memiliki daktilitas yang tinggi).

Agar struktur gedung tinggi memiliki daktilitas yang tinggi, harus diupayakan supaya sendi-sendi plastis yang terjadi akibat beban gempa maksimum ada di dalam balok-balok dan tidak terjadi dalam kolom-kolom, kecuali pada kaki kolom yang paling bawah dan pada bagian atas kolom penyangga atap. Hal ini dapat tercapai bila kapasitas (momen leleh) kolom lebih tinggi daripada kapasitas (momen leleh) balok yang bertemu pada kolom tersebut(konsep strong column weak beam).



Gambar 3.2 Perilaku struktur daktail dan getas (sumber: <https://hesa.co.id/konsep-daktilitas-pada-struktur-bangunan>)

Struktur dengan daktilitas tertentu akan memungkinkan terjadinya sendi plastis secara bertahap pada elemen-elemen struktur yang telah ditentukan. Dengan terbentuknya sendi plastis pada struktur, maka struktur akan mampu menahan beban gempa yang besar tanpa memberikan kekuatan berlebihan pada elemen struktur karena energi kinetik akibat gerakan tanah yang diterima akan diserap oleh sendi plastis tersebut. Gambaran struktur daktail dan struktur yang getas paska terkena guncangan gempa palu, 2018, seperti gambar di atas.

Desain bangunan tahan gempa memiliki beberapa konsep kunci yang bertujuan untuk mengurangi risiko kerusakan dan melindungi kehidupan serta properti. Berikut adalah beberapa konsep utama dalam desain bangunan tahan gempa:

- a. Elastisitas dan Fleksibilitas:  
Bangunan tahan gempa harus dirancang untuk menanggung getaran tanah yang disebabkan oleh gempa bumi. Material dan struktur bangunan harus elastis dan fleksibel sehingga dapat menyerap energi gempa tanpa mengalami kerusakan permanen.
- b. Peredaman Energi:  
Penggunaan peredam gempa, seperti peredam kejut atau peredam energi, membantu menyerap dan mengurangi energi gempa yang diterima oleh bangunan. Ini dapat dilakukan dengan menggunakan bantalan elastomer, per, atau bahan peredam lainnya.
- c. Isolasi Seismik:  
Sistem isolasi seismik memisahkan struktur bangunan dari getaran tanah dengan menggunakan peredam atau isolator gempa. Ini membantu melindungi bangunan dari kerusakan yang

disebabkan oleh getaran gempa dan meningkatkan keselamatan.

d. Penguatan Struktur:

Struktur bangunan harus diperkuat untuk menanggung beban gempa. Ini dapat mencakup penggunaan kolom dan balok yang lebih besar, dinding geser, dan elemen struktural lainnya yang dirancang untuk memberikan kekuatan tambahan.

e. Konsep Dukungan Sendiri:

Bangunan tahan gempa seringkali dirancang dengan prinsip dukungan sendiri, yang berarti bahwa struktur tersebut memiliki kemampuan untuk menahan beban sendiri tanpa tergantung pada dukungan eksternal.

f. Pemilihan Material:

Pemilihan material yang tepat sangat penting. Material yang kuat dan elastis seperti baja dan beton sering digunakan dalam konstruksi bangunan tahan gempa. Pemilihan dan penempatan material harus mempertimbangkan sifat-sifat dinamis tanah di lokasi bangunan.

g. Desain Beban Gempa:

Bangunan tahan gempa harus dirancang dengan memperhitungkan spektrum respons gempa, yang mencerminkan karakteristik getaran tanah di lokasi tersebut. Desain beban gempa melibatkan perhitungan yang hati-hati untuk memastikan bahwa bangunan mampu menahan guncangan gempa yang diantisipasi.

h. Perencanaan dan Evaluasi Geoteknik:

Evaluasi geoteknik yang cermat diperlukan untuk memahami sifat tanah di lokasi bangunan. Faktor-faktor seperti kepadatan tanah, tipe tanah, dan struktur geologi harus diperhitungkan dalam desain.

- i. Prinsip Redundansi:  
Konsep redundansi memastikan bahwa jika satu bagian struktur mengalami kerusakan, masih ada jalur dukungan lain yang dapat menanggung beban. Hal ini meningkatkan keselamatan dan kemampuan bangunan untuk bertahan saat gempa.
- j. Pemantauan dan Perawatan:  
Bangunan tahan gempa memerlukan pemantauan dan perawatan yang teratur untuk memastikan bahwa semua sistem dan komponen tetap berfungsi dengan baik.

Semua konsep ini bersama-sama membentuk fondasi desain bangunan tahan gempa yang efektif dan dapat memberikan perlindungan maksimal terhadap guncangan gempa bumi.

#### **3.4. Mekanisme Kerja Beban Gempa pada Struktur Bangunan**

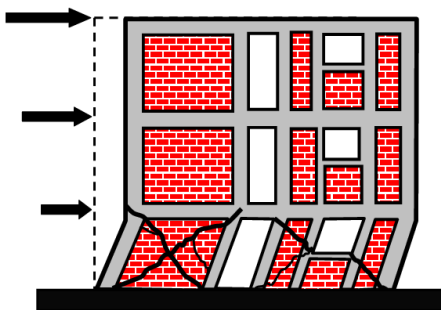
Pergerakan lapisan bumi akan mengakibatkan terjadinya tekanan pada bidang pertemuan lempeng ataupun patahan/sesar, sehingga akan terjadi penimbunan energi di sepanjang bidang tersebut. Setelah terjadi penimbunan energi dalam waktu yang relatif lama, akumulasi energi menjadi cukup kuat untuk mengeser bidang pertemuan dan menghasilkan pusat gempa, yang diikuti dengan pelepasan energi secara cepat sebagai gelombang gempa yang menjalar ke segala arah. Gelombang gempa tersebut menyebabkan pergerakan lapisan tanah, yang selanjutnya akan mengakibatkan terjadinya goyangan pada struktur bangunan yang berada di atasnya, sehingga terjadi gaya inersia dan deformasi pada bangunan tersebut.

Gempa bumi menyebabkan goyangan pada tanah sehingga bagian dasar bangunan di atasnya akan ikut tergoyang. Sesuai hukum kelembaman Newton, meskipun bagian dasar bangunan bergerak bersama tanah, tetapi atap bangunan

cenderung tetap berada di posisinya. Oleh karena dinding dan tiang-tiang saling berhubungan dengan atap, maka atap akan terseret bersama rumah. Keadaan ini mirip dengan saat kita berdiri di dalam bus kota, dan tiba-tiba bus tersebut berjalan. Kaki kita bergerak bersama bus, sedangkan badan kita terdorong ke belakang. Kecenderungan untuk tetap pada posisi semula seperti di atas disebut inersia. Pada bangunan, karena dinding atau tiang bersifat fleksibel, arah gerakan atap akan berbeda dengan gerakan tanah.

Bangunan dan struktur lainnya harus mengikuti serangkaian aturan dan prosedur yang dikenal sebagai prinsip desain seismik untuk menahan gaya yang dihasilkan oleh gempa bumi. Pedoman ini mencakup penggunaan sistem rangka tahan gempa, desain berbasis gaya, desain berbasis kinerja, isolasi dasar, disipasi energi, interaksi tanah-struktur, dan kepatuhan terhadap norma dan standar bangunan.

Konsep desain ini secara signifikan dapat menurunkan risiko keruntuhan dan kegagalan struktural lainnya, serta meminimalkan kerusakan pada elemen non-struktural, sehingga menjamin keselamatan penghuni bangunan. Keruntuhan yang dihindari adalah keruntuhan soft-storey dimana pada kondisi ini lantai bawah tidak mampu menahan beban di atasnya.



Gambar 3.3 Keruntuhan soft-storey

Untuk menghitung gaya-gaya yang akan dialami suatu bangunan selama gempa bumi, perhitungan beban seismik merupakan komponen penting dalam desain seismik. Perhitungan ini dilakukan dengan bantuan program komputer dan didasarkan pada sejumlah variabel, termasuk lokasi bangunan, keadaan tanah di sekitarnya, dan bahaya gempa yang direncanakan. Menentukan gempa rencana, menghitung gaya gempa, menerapkan kombinasi beban, menganalisis struktur, dan memeriksa kesesuaian desain dengan kode adalah bagian dari proses.

Perhitungan beban gempa merupakan aspek penting dalam desain seismik, karena perhitungan tersebut digunakan untuk menentukan gaya-gaya yang akan diterima suatu bangunan selama gempa bumi. Perhitungan ini biasanya dilakukan dengan menggunakan program komputer yang mensimulasikan dampak gempa bumi pada sebuah bangunan, dan didasarkan pada beberapa faktor seperti lokasi bangunan, kondisi tanah, dan bahaya gempa yang direncanakan.

Pada bangunan tinggi tahan gempa umumnya gaya-gaya pada kolom cukup besar untuk menahan beban gempa yang terjadi sehingga umumnya perlu menggunakan elemen-elemen struktur kaku berupa dinding geser untuk menahan kombinasi gaya geser, momen, gaya aksial yang timbul akibat beban gempa. Dinding geser yang kaku pada bangunan, akan menyerap sebagian besar beban gempa.

Kerja sama antara sistem rangka penahan momen dan dinding geser merupakan suatu keadaan khusus sebagaimana diatur dalam SNI 2847: 2019, dimana dua struktur yang berbeda sifatnya tersebut digabungkan. Dari gabungan keduanya diperoleh suatu struktur yang lebih kuat dan ekonomis. Kerja sama ini dapat dibedakan menjadi beberapa macam sistem struktur :

1. Sistem dinding penumpu yaitu sistem struktur yang tidak memiliki rangka ruang pemikul beban gravitasi secara Dinding penumpu atau sistem bresing memikul hampir semua beban gravitasi. Beban lateral dipikul dinding geser atau rangka bresing. eban lateral dipikul dinding geser atau rangka bresing. Sistem Dinding Penumpu, yang bisa diklasifikasikan sebagai berikut :
  - a. DSBB ( Dinding Struktural Beton Biasa)
  - b. DSBK (Dinding Struktural Beton Khusus)
2. Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPM), yang dapat diklasifikasikan, sebagai berikut:
  - a. SRPMB (Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa)
  - b. SRPMM (Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah)
  - c. SRPMK (Sistem Rangka Pemikul Beban Khusus)

Sistem rangka pemikul momen ini pada dasarnya memiliki rangka ruang pemikul beban gravitasi secara lengkap. Beban lateral dipikul rangka pemikul momen terutama melalui mekanisme lentur.

3. Sistem interaksi dinding geser dengan rangka. Dalam desain struktur bangunan, sistem interaksi antara dinding geser (shear wall) dan rangka (frame) merupakan strategi yang umum digunakan untuk meningkatkan kekuatan dan stabilitas struktural. Dinding geser dan rangka bekerja bersama-sama untuk menanggulangi beban lateral, seperti gaya angin atau gempa, yang dapat mempengaruhi integritas struktural suatu bangunan. Dinding geser berfungsi sebagai pengaku struktur yang menerus sampai ke pondasi. Selain itu, dinding geser juga berfungsi sebagai pengaku seluruh bangunan yang dirancang untuk menahan gaya geser pada bidang dinding, seperti gaya lateral akibat gempa bumi. Dinding

geser pada umumnya bersifat kaku, sehingga deformasi (lendutan) menjadi lebih kecil.

### **3.5. Perilaku Material akibat Gempa Bumi**

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.

Dalam melakukan perencanaan perlu diketahui beberapa parameter penting, yaitu massa ( $m$ ), kekakuan ( $k$ ), redaman ( $c$ ), dan waktu getar alami struktur.

#### **A. Kekakuan ( $K$ )**

Kekakuan suatu struktur adalah gaya yang dapat disimpan oleh sistem struktur bila struktur itu diberi perpindahan baik itu perpanjangan, perpendekan, perputaran sudut, atau deformasi- deformasi lainnya. Kekakuan dari suatu sistem struktur adalah penjumlahan dari kekakuan masing-masing elemen pembentuk struktur tersebut, yang meliputi panjang ( $L$ ), modulus elastisitas ( $E$ ), momen inersia ( $I$ ), momen inersia polar ( $J$ ), modulus elastisitas geser ( $G$ ), dan luas penampang ( $A$ ).

Untuk struktur berderajat kebebasan banyak kekakuan struktur berupa matriks  $n \times n$  yang simetri, dengan  $n$  adalah jumlah derajat kebebasan (degree of freedom). Pada analisis pengaruh gempa pada struktur gedung, struktur gedung dianggap sebagai bangunan dengan kekakuan lantai (balok dan pelat) sangat besar jika dibanding kekakuan kolom, sehingga untuk pemodelan dua dimensi sistem portal satu

lantai mempunyai satu derajat kebebasan yaitu perpindahan terhadap arah lateral. Sedangkan untuk pemodelan tiga dimensi sistem portal satu lantai mempunyai tiga derajat kebebasan yaitu dua arah perpindahan (sumbu  $x$  dan sumbu  $y$ ) dan rotasi dari lantai.

### B. Redaman (C)

Redaman pada suatu struktur yang bergetar menyatakan adanya fenomena disipasi energi atau penyerapan energi. Salah satu contoh bila struktur digetarkan semakin lama amplitudonya semakin kecil hingga akhirnya struktur itu diam. Redaman struktur dimodelkan sama dengan redaman viscous yaitu besarnya gaya redaman yang dialami oleh suatu struktur yang bergetar berbanding lurus dengan koefisien redaman serta kecepatan getaran struktur. Untuk menyatakan besarnya redaman biasanya dinyatakan sebagai persentase dari redaman kritis yang mungkin terjadi. Untuk gedung, nilai koefisien persentase dari redaman kritis ini tidak lebih dari 20%, sehingga pengaruh redaman pada gedung tidak terlalu dominan.

### C. Waktu Getar Alami Struktur

Waktu getar alami adalah waktu yang dibutuhkan oleh struktur untuk bergetar satu kali bolak-balik tanpa adanya gaya luar. Besarnya waktu getar alami struktur perlu diketahui agar peristiwa resonansi pada struktur dapat dihindari. Peristiwa resonansi struktur adalah suatu keadaan dimana frekwensi alami pada struktur sama dengan frekwensi dari beban luar yang bekerja sehingga dapat menyebabkan keruntuhan pada struktur.

## **3.6. Penyebab Kerusakan Akibat Gempa dan Cara Pencegahannya**

Pada dasarnya, bangunan-bangunan yang ada dapat dibagi menjadi dua kategori berdasarkan proses perencanaan dan

pelaksanaannya, yaitu *engineered construction* dan *non-engineered construction*. *Engineered construction* adalah bangunan yang direncanakan berdasarkan perhitungan struktur, dan dilaksanakan atau dibangun di bawah pengawasan para ahli bangunan. Sebagai contoh dari *engineered construction* adalah struktur bangunan gedung bertingkat, struktur jembatan dan jalan layang, fasilitas pembangkit tenaga listrik atau tenaga nuklir, dan bendungan. Bangunan-bangunan ini pada umumnya menggunakan bahan-bahan dan sistem struktur yang modern, seperti beton bertulang dan baja.

*Non-engineered construction* adalah bangunan yang dibangun secara spontan berdasarkan kebiasaan tradisional setempat, dan pelaksanaannya tidak dibantu arsitek atau ahli bangunan, melainkan mengikuti cara-cara yang diperoleh dari hasil pengamatan tingkat laku bangunan sejenis yang mengalami gempa bumi di masa lalu. *Non-engineered construction* mencakup bangunan tradisional, bangunan tembokan (bata, batu, batako) yang memakai perkuatan (kolom dan balok praktis) maupun yang tidak memakai perkuatan, bangunan kayu dan bambu, bangunan beton bertulang sederhana, bangunan rangka baja sederhana. Bangunan *non-engineered construction* dapat dibagi menjadi dua kategori. Yang termasuk kategori pertama adalah, bangunan yang dibangun menurut tradisi dan disesuaikan dengan budaya dan bahan bangunan yang tersedia di daerah tersebut. Bangunan yang termasuk kategori ini pada umumnya disebut bangunan tradisional. Bangunan tradisional pada umumnya mempunyai ketahanan yang cukup baik terhadap gempa. Pola permukiman manusia, cara cara tradisional, serta bahan bangunan yang dipakai untuk bangunan tradisional pada suatu wilayah merupakan bukti dari keselerasan hidup berdampingan secara harmonis antara manusia dengan dengan alam.

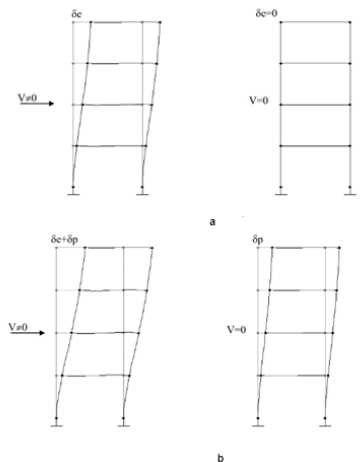
Dari pengalaman dari kejadian gempa yang telah ada, seringkali bangunan non engineered mengalami kerusakan yang sangat parah dibandingkan dengan bangunan engineered. Oleh karena itu penyebab kerusakan yang paling sering terjadi adalah bangunan atau struktur tidak didisain dengan baik terhadap beban gempa.

Pada struktur yang bersifat getas (brittle), maka jika beban yang bekerja pada struktur sedikit melampaui batas maksimum kekuatan elastisnya, maka struktur tersebut akan patah atau runtuh. Pada struktur yang duktail (ductile) atau liat, jika beban yang ada melampaui batas maksimum kekuatan elastisnya, maka struktur tidak akan runtuh, tetapi struktur akan mengalami deformasi plastis (inelastis). Deformasi plastis adalah deformasi yang apabila bebannya dihilangkan, maka deformasi tersebut tidak akan hilang. Pada kondisi plastis ini struktur akan mengalami deformasi yang bersifat permanen, atau struktur tidak dapat kembali kepada bentuknya yang semula. Pada struktur yang duktail, meskipun terjadi deformasi yang permanen, tetapi struktur tidak mengalami keruntuhan.

Pada kenyataannya, jika suatu beban bekerja pada struktur, maka pada tahap awal, struktur akan berdeformasi secara elastis. Jika beban yang bekerja terus bertambah besar, maka setelah batas elastis dari bahan struktur dilampaui, struktur kemudian akan berdeformasi secara plastis (inelastis). Dengan demikian pada struktur akan terjadi deformasi elastis dan deformasi plastis, sehingga jika beban yang bekerja dihilangkan, maka hanya sebagian saja dari deformasi yang hilang (deformasi elastis =  $\delta e$ ), sedangkan sebagian deformasi akan bersifat permanen (deformasi plastis =  $\delta p$ ). Perilaku deformasi elastis dan plastis dari struktur diperlihatkan pada gambar berikut.

Dari uraian di atas tampak bahwa, pada struktur yang duktail, beban yang besar akibat gempa tidak akan

menyebabkan keruntuhan dari struktur, lebih-lebih karena beban gempa merupakan beban dinamis yang arahnya bolak-balik. Beban gempa yang besar akan menyebabkan deformasi yang permanen dari struktur akibat rusaknya elemen-elemen dari struktur seperti balok dan kolom. Pada kondisi seperti ini, walaupun elemen-elemen struktur bangunan mengalami kerusakan, namun secara keseluruhan struktur tidak mengalami keruntuhan.



Gambar 3.4 Deformasi elastis (a) dan plastis (b) pada struktur

Energi gempa yang bekerja pada struktur bangunan, akan dirubah menjadi energi kinetik akibat getaran dari massa struktur, energi yang dihamburkan akibat adanya pengaruh redaman dari struktur, dan energi yang dipancarkan oleh bagian-bagian struktur yang mengalami deformasi plastis. Dengan demikian sistem struktur yang bersifat daktail dapat membatasi besarnya energi gempa yang masuk pada struktur, sehingga pengaruh gempa dapat berkurang.

Beban gempa sebenarnya yang bekerja pada struktur bangunan dapat melampaui beban gempa rencana yang

tercantum di dalam peraturan. Di dalam peraturan, besarnya beban gempa rencana yang diperhitungkan bekerja pada struktur bangunan adalah Gempa Sedang. Dengan demikian, jika terjadi Gempa Kuat, maka gaya-gaya dalam (momen lentur, gaya lintang, gaya normal, dan torsi) yang terjadi pada elemen-elemen struktur seperti balok dan kolom, dapat melampaui gaya-gaya dalam yang sudah diperhitungkan. Jika hal ini tidak ditinjau di dalam perencanaan, maka pada saat terjadi Gempa Kuat, elemen-elemen dari struktur akan mengalami kerusakan, bahkan secara keseluruhan struktur dapat mengalami keruntuhan. Agar struktur bangunan mempunyai kemampuan yang cukup dan tidak terjadi keruntuhan pada saat terjadi Gempa Kuat, maka dapat dilakukan dua cara yaitu:

- a. Membuat struktur bangunan sedemikian kuat, sehingga struktur bangunan tetap berperilaku elastis pada saat terjadi Gempa Kuat. Struktur bangunan yang dirancang tetap berperilaku elastis pada saat terjadi Gempa Kuat adalah tidak ekonomis. Meskipun pada saat terjadi Gempa Kuat struktur ini tidak mengalami kerusakan yang berarti, sehingga tidak memerlukan biaya perbaikan yang besar, namun pada saat pembuatannya, struktur bangunan ini memerlukan biaya yang sangat mahal. Struktur bangunan yang didesain tetap berperilaku elastis pada saat terjadi Gempa Kuat, disebut Struktur Tidak Daktail. Penggunaan sistem struktur portal tidak daktail masih dianggap ekonomis untuk bangunan gedung bertingkat menengah dengan ketinggian tingkat antara 4 s/d 7 lantai, dan terletak pada wilayah dengan pengaruh kegempaan ringan sampai sedang.
- b. Membuat struktur bangunan sedemikian rupa sehingga mempunyai batas kekuatan elastis yang hanya mampu menahan Gempa Sedang saja. Dengan

demikian, struktur ini masih bersifat elastis pada saat terjadi Gempa Ringan atau Gempa Sedang. Pada saat terjadi Gempa Kuat, struktur bangunan harus dirancang agar mampu untuk berdeformasi secara plastis. Jika struktur mempunyai kemampuan untuk dapat berdeformasi plastis cukup besar, maka hal ini dapat mengurangi sebagian dari energi gempa yang masuk ke dalam struktur. Struktur bangunan yang didesain berperilaku plastis pada saat terjadi Gempa Kuat, disebut Struktur Daktail. Penggunaan sistem struktur portal daktail cukup ekonomis untuk bangunan gedung bertingkat menengah sampai tinggi, yang dibangun pada wilayah dengan pengaruh kegempaan kuat.

### **3.7. Peraturan Kegempaan di Indonesia**

Di Indonesia, pengelolaan mitigasi bencana, termasuk gempa bumi, diatur oleh berbagai peraturan dan lembaga pemerintah. Beberapa peraturan terkait kegempaan di Indonesia antara lain:

- a. UU No. 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana:
  - Memberikan dasar hukum untuk upaya penanggulangan bencana di Indonesia.
  - Menetapkan tanggung jawab pemerintah dan masyarakat dalam mengurangi risiko bencana termasuk gempa bumi.
- b. Peraturan Pemerintah (PP) No. 21 Tahun 2008 tentang Penyelenggaraan Penanggulangan Bencana:

Menjelaskan lebih rinci mengenai struktur organisasi, tugas, dan fungsi Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), serta peran daerah dan masyarakat dalam penanggulangan bencana.

- c. Peraturan Presiden (Perpres) No. 8 Tahun 2008 tentang Rencana Aksi Nasional Penanggulangan Bencana:

Menetapkan rencana aksi nasional untuk mengurangi risiko bencana, termasuk upaya-upaya terkait gempa bumi.

- d. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Permen PUPR) No. 07/PRT/M/2014 tentang Penyelenggaraan Bangunan Tahan Gempa:

- Menetapkan persyaratan teknis untuk bangunan agar tahan gempa.
- Menjelaskan langkah-langkah teknis dan tata cara perencanaan serta pelaksanaan konstruksi bangunan tahan gempa.

- e. Standar Nasional Indonesia (SNI) untuk Bangunan Tahan Gempa:

- SNI 1726:2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung.
- SNI 03-1727-2013 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung Bertingkat.

Selain regulasi di atas, sejumlah lembaga terlibat dalam penanganan gempa bumi di Indonesia, termasuk Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), dan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). Peran aktif dari pemerintah, peneliti, dan masyarakat sangat penting dalam meningkatkan kewaspadaan dan mitigasi terhadap gempa bumi di Indonesia. Kriteria desain untuk struktur gedung atau bangunan tahan gempa mensyaratkan bahwa bangunan tersebut harus didesain agar mampu menahan beban gempa

yang terjadi setiap 500 tahun. Hal tersebut juga sesuai dan didukung oleh SNI gempa yang berlaku, yaitu SNI 1726:2019.

SNI 1726 adalah standar nasional Indonesia yang mengatur tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. Standar ini mencakup pedoman untuk perencanaan dan konstruksi bangunan agar tahan gempa. Peraturan ini telah mengalami beberapa kali perubahan, yaitu PBBUG1983; SNI 1726:2002; SNI 1726:2012; SNI 1726: 2019. SNI 1726:2019 mengacu dari ASCE 7-16 yang disesuaikan dengan kondisi gempa di Indonesia menggantikan SNI 1726:2012.

Dalam perencanaan struktur bangunan di Indonesia terdapat standar perencanaan yang terus mengalami perubahan secara berkala mengikuti kondisi tanah di Indonesia. Dengan adanya perubahan pada peta sumber dan bahaya gempa Indonesia pada tahun 2017, menyebabkan standar gempa di Indonesia juga mengalami perubahan yang cukup berdampak pada perencanaan struktur di Indonesia.

Seiring berjalannya waktu, BSN (Badan Standardisasi Nasional) Indonesia dapat mengalami perubahan dan pembaruan dalam standar ini. Perubahan tersebut mencakup penyesuaian terhadap pengetahuan ilmiah baru tentang gempa, pengalaman dari peristiwa gempa terbaru, teknologi konstruksi yang baru, atau perubahan kebijakan pemerintah terkait keamanan bangunan. Pembaharuan peraturan ini memiliki urgensi karena beberapa faktor yaitu;

1. Terjadinya peningkatan sumber gempa.
2. Frekuensi kejadian bahaya guncangan aktifitas gempa cukup tinggi disertai bahaya ikutan: tsunami, likuifaksi, kerusakan permukaan tanah, dan longsor.
3. Sering terjadi resiko kegagalan bangunan yang rusak/runtuh dan korban jiwa gempa terjadi.

Peraturan gempa yang pertama kali digunakan sebagai acuan perhitungan beban gempa adalah Peraturan Muatan Indonesia (PMI). Seiring dengan berkembangnya waktu, maka peraturan gempa yang digunakan berganti menggunakan Peraturan Perencanaan Tahan Gempa Indonesia untuk Gedung 1983 (PPTGIUG-1983). Beberapa tahun kemudian, peraturan yang digunakan berganti menjadi SNI 03-1726-2002 yang dikenal dengan SNI Gempa 2002. Selanjutnya akibat terjadinya gempa yang sangat besar maka peraturan gempa kembali berubah menjadi SNI 1726-2012 yang dikenal juga dengan SNI Gempa 2012. Dan sampai sekarang Indonesia telah memiliki peraturan gempa yang terbaru yaitu SNI 1726: 2019.

Proses perkembangan peraturan gempa di Indonesia adalah sebagai berikut:

#### **A. Peraturan Beton Indonesia, tahun 1966.**

Pada peraturan ini peta gempa Indonesia pertama dibuat. Dikutip dari Geophysical Notes No.2 tahun 1962, Wilayah Indonesia diperhitungkan terhadap gempa (dibuat tahun 1962 dan Irian Jaya belum masuk wilayah Republik Indonesia). Dalam peta gempa tahun 1962 ditunjukkan daerah rawan gempa terdapat pada Kalimantan bagian Timur, Sulawesi bagian Utara, Kepulauan Maluku, Sumatera bagian Barat, Jawa bagian Selatan, kepulauan Nusa Tenggara.

#### **B. Peraturan Muatan Indonesia, tahun 1970**

Pada peraturan ini memiliki kesamaan isi dengan PBI 1966 dengan pembaharuan peta gempa seluruh wilayah Indonesia termasuk Irian Jaya. Pertama kali peraturan ini mengatur pembebanan gempa, berupa pembebanan sementara yaitu kombinasi beban mati, beban hidup, beban hidup reduksi, dan beban gempa. Perhitungan struktur dilakukan secara elastis. Pembebanan sementara ini diacu oleh peraturan beton Indonesia 1971.

### **C. Peraturan Perencanaan Tahan Gempa Indonesia untuk Gedung 1983**

Peraturan ini dikembangkan setelah terjadi gempa Bali 1976 dengan korban jiwa 559 orang, luka berat 850 orang & luka ringan 3200 orang serta 75% rumah rusak berat di Tabanan dan Jembrana. Isi dari peraturan ini revisi dari PMI 1970 dengan adanya kerjasama bilateral antara Pemerintah Indonesia dan Pemerintah Selandia. Response Spektra didasarkan pada periode ulang 200 tahun (kemungkinan terjadi 10% dalam jangka waktu 20 tahun). Peta Gempa diperbarui menjadi 6 zona pembagian.

Dalam perancangan konsep daktilitas struktur sangat penting dimana konsep keruntuhan harus aman. Pada peraturan ini diperkenalkan mekanisme goyangan dengan mekanisme sendi plastis, pemenuhan Konsep Strong Column Weak Beam, dan Perencanaan Kapasitas. Perancangan dapat dilakukan dengan tiga cara analisis yaitu Analisa Statik Ekuivalen, Analisa Response Spectrum, dan Analisa Respon Riwayat Waktu.

### **D. Peraturan pada tahun 1989**

- Tertuang dalam beberapa peraturan (tanpa perubahan isi)
- Peraturan Perencanaan Tahan Gempa Indonesia untuk Gedung 1983
- Tata Cara Perencanaan Pembebanan Indonesia untuk Gedung 1983
- Buku Pedoman Perencanaan untuk Struktur Beton Bertulang Biasa dan Struktur Tembok Bertulang untuk Gedung 1983

- Pedoman Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Rumah dan Gedung SKBI 1.3.53.1987
- Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Rumah dan Gedung, SNI-03-1726-1989, Meneg PU, 3 Nop 97

#### **E. SNI 03-1726-2002 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Gedung**

Peta Gempa pada peraturan ini mengacu pada Uniform Building Code 1997 dan kompilasi dari empat peta gempa hasil analisis probabilistic dari empat tim peneliti yang berbeda yang mewakili, yaitu a) Universitas (ITB, Firmansyah dan Ihsyan, 1999), b) Departemen Pekerjaan Umum (Najoan), c) Pusat Penelitian Geologi (Kertapati), d) Konsultan (Shah dan Boen, 1996). Nilai percepatan maksimum gempa di batuan dasar disusun berdasarkan probabilitas terlampaui 10% untuk masa layan bangunan 50 tahun atau perioda ulang gempa 500 tahun. Sehingga semakin Panjang periode ulang gempa tentu semakin besar pengaruh beban yang akan diterima oleh struktur. Gaya gempa dihitung berdasarkan lokasi dan kondisi tanah lokal yang dikelompokkan menjadi 3 kategori yaitu, keras, sedang, dan lunak.

#### **F. Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Gedung, SNI 03-1726-2012**

Peraturan ini dikembangkan setelah terjadi gempa; gempa Aceh 2004 ( $M_w = 9.2$ ), gempa Yogya ( $M_w = 6.3$ ), gempa Nias 2005 ( $M_w = 8.7$ ) dan Padang 2009 ( $M_w = 7.6$ ). Peraturan ini mengacu ACE/SEI 7- 2010 (2010) dan FEMAP 750 (Building Seismic Safety Council, 2009). Penentuan peta gempa berdasarkan analisis bahaya seismic probabilistic (deterministic seismic hazard analysis). Dengan bahaya seismic probabilistic didasarkan 2% kemungkinan terlampaui dalam kurun waktu 50 tahun atau perioda ulang

sekitar 2500 tahun. Ditambahkannya dua parameter penting dalam perancangan ketahanan gempa; parameter respons spectral percepatan gempa tertimbang maksimum redaman 5 % pada perioda pendek ( $S_s$ ), dan parameter respons spectral percepatan gempa tertimbang maksimum redaman 5 % pada perioda 1 detik ( $S_1$ ).

### **G. Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017**

Dikarenakan peta gempa telah berumur lebih dari 5 tahun terhitung dari tahun 2012, maka kemudian dilakukan penyusunan pemutakhiran lanjut peta sumber dan bahaya gempa Indonesia, dan secara berkala akan diperbarui per 5 tahun. Pemutakhiran peta gempa dilakukan karena adanya identifikasi sumber kegempaan yang baru, peningkatan keakuratan estimasi parameter penting dalam mengkonstruksi peta gempa dan pendetailan sumber gempa background, persamaan atenuasi gelombang gempa terkini.

### **H. Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Gedung SNI 03-1726-2019**

Pada dasarnya peraturan ini sama dengan SNI 1726:2012, perbedaannya pada:

- Sumber gempa yang meningkat
- Mengacu pada ASCE 7-16
- Penataan kembali kombinasi beban dengan perubahan kombinasi beban gempa horizontal dan vertical
- Penambahan peta periode panjang (Long Transition Period/TL) dikhususkan untuk perancangan bangunan tinggi
- Analisa ragam respons spektrum (sebelumnya belum ada)
- Analisis respons spektrum pada lokasi dekat sesar aktif (sebelumnya belum ada)

- Memperhitungkan pengaruh likuifaksi (sebelumnya belum ada)

Dalam prosedur perencanaan berdasarkan SNI 1726:2019, struktur bangunan tahan gempa boleh direncanakan terhadap beban yang telah direduksi suatu faktor modifikasi respons struktur (faktor R), hal ini merupakan representasi tingkat daktilitas yang dimiliki oleh struktur. Dengan penerapan konsep ini, pada saat gempa kuat sedang terjadi, elemen-elemen struktur bangunan tertentu yang telah dipilih diperbolehkan mengalami plastifikasi atau kerusakan sebagai sarana untuk menyerap energi gempa yang diterima oleh struktur. Elemen-elemen tertentu tersebut pada umumnya elemen struktur yang perilaku kerusakannya bersifat daktil dan tidak mudah runtuh. Elemen-elemen struktur lain yang diharapkan agar tidak mengalami kerusakan juga harus tetap berperilaku elastis selama gempa kuat terjadi.

Dengan adanya standar gempa Indonesia yang baru yaitu Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Rumah dan Gedung (SNI 1726-2012), hal ini menekankan tidak berlakunya lagi standar gempa yang lama yaitu SNI 1726-2012. Hal ini penting karena menurut standar yang baru ini, untuk perhitungan beban gempa pada struktur bangunan gedung, mempunyai periode ulang 500 tahun, sedangkan menurut standar yang lama periode ulang tersebut hanya 200 tahun. Seperti diketahui, semakin panjang periode ulang suatu gempa, akan semakin besar juga pengaruh gempa tersebut pada struktur bangunan. Di samping itu, di dalam standar yang baru ini diberikan juga definisi baru mengenai jenis tanah yang berbeda dengan yang tercantum dalam standar yang lama. Dengan demikian, jelas standar yang lama tidak dapat dipakai lagi untuk perencanaan. Meskipun demikian, struktur bangunan gedung yang sudah ada yang ketahanan gempanya telah direncanakan berdasarkan

standar lama, ketahanan tersebut pada umumnya masih cukup memadai. Untuk hal ini dapat dikemukakan beberapa alasan. Pertama, faktor reduksi gempa  $R$  menurut standar lama adalah relatif lebih kecil dari pada menurut standar yang baru. Misalnya untuk struktur yang direncanakan bersifat daktail penuh, menurut standar lama besarnya faktor reduksi gempa  $R = 6$ , sedangkan menurut standar yang baru  $R = 8,5$ , sehingga untuk periode ulang gempa yang berbeda beban gempa yang harus diperhitungkan menurut standar lama dan standar baru saling mendekati. Kedua, dengan definisi jenis tanah yang baru. Banyak jenis tanah yang menurut standar lama termasuk jenis tanah lunak, menurut standar baru termasuk jenis tanah sedang, sehingga beban gempa yang perlu diperhitungkan lebih saling mendekati lagi. Ketiga, bangunan gedung yang sudah ada telah menjalani sebagian dari umur rencananya, sehingga dengan risiko yang sama terjadinya keruntuhan struktur bangunan gedung dalam sisa umur rencananya, beban gempa yang harus diperhitungkan menjadi relatif lebih rendah dari pada menurut standar yang baru untuk bangunan gedung baru. Meskipun menggunakan periode ulang gempa yang berbeda, tetapi baik standar gempa yang lama maupun standar gempa yang baru menggunakan falsafah perencanaan ketahanan gempa yang sama, yaitu bahwa akibat gempa yang kuat, struktur bangunan dapat mengalami kerusakan yang berat tetapi tidak diperkenankan untuk runtuh, hal ini dapat mencegah jatuhnya korban manusia. Sedangkan akibat gempa ringan sampai gempa sedang kenyamanan penghunian tetap terjamin, kerusakan yang terjadi masih dapat diperbaiki dan pelayanan dari fungsi bangunan tetap dapat berjalan.

Jika besarnya beban gempa sudah dapat diperkirakan, maka pertanyaan selanjutnya adalah, bagaimana menentukan arah beban gempa terhadap bangunan. Dalam kenyataannya arah datangnya gempa terhadap bangunan tidak dapat ditentukan

dengan pasti, artinya pengaruh gempa dapat datang dari sembarang arah. Jika bentuk denah dari bangunan simetris dan teratur, sehingga bangunan jelas memiliki sistem struktur pada dua arah utama bangunan yang saling tegak lurus, perhitungannya arah gempa dapat dilakukan lebih sederhana. Pembebanan gempa tidak penuh tetapi biaksial atau sembarang dapat menimbulkan pengaruh yang lebih rumit terhadap struktur gedung ketimbang pembebanan gempa penuh tetapi uniaksial. Untuk mengantisipasi kondisi ini Applied Technology Council (ATC, 1984) menetapkan bahwa, arah gempa yang biaksial dapat disimulasikan dengan meninjau beban gempa rencana yang disyaratkan oleh peraturan, bekerja pada ke dua arah sumbu utama struktur bangunan yang saling tegak lurus secara simultan. Besarnya beban gempa pada struktur dapat diperhitungkan dengan menjumlahkan 100% beban gempa pada satu arah dengan 30% beban gempa pada arah tegak lurus. Bila bentuk denah dari bangunan tidak simetris atau tidak beraturan, maka sulit untuk menentukan arah beban gempa yang paling menentukan. Untuk ini perlu dilakukan analisis struktur dengan meninjau pengaruh dari beban gempa pada masing-masing arah dari struktur. Untuk berbagai arah gempa yang bekerja, bagian yang kritis dari elemen-elemen struktur akan berbeda pula. Berapa kemungkinan arah gempa yang akan ditinjau pada analisis, sepenuhnya tergantung pada perencanaan struktur.

### **3.8. Tugas dan Latihan**

Buatlah secara berkelompok paparan mengenai struktur tahan gempa, presentasikan dan didiskusikan di depan kelas.

## *Bab 4*

# *Disain Respons Spektrum Berdasarkan SNI 1726:2019*

### **4.1. Capaian Pembelajaran**

**D**alam bab ini, mahasiswa diharapkan mampu memahami dan mendefinisikan respons spektrum untuk masing masing daerah berdasarkan prosedur yang termuat dalam SNI 1726:2019. Kompetensi mahasiswa akan diuji dalam bentuk tugas dan presentasi tentang grafik respons spektrum disain berdasarkan prosedur SNI 1976:2019 dan peta kegempaan Indonesia.

### **4.2. Relevansi**

Ada keterkaitan yang sangat tinggi pada bab ini dengan ilmu rekayasa gempa karena kemampuan membuat grafik respon spektrum ini diperlukan dalam analisa pembebanan struktur akibat gempa bumi.

Respons spektrum desain dan pembebanan gempa memiliki hubungan erat dalam konteks perencanaan dan analisis struktur bangunan. Pemahaman tentang hubungan ini sangat penting bagi insinyur struktural untuk memastikan bahwa struktur dapat menahan gempa dengan efektif. Respons spektrum desain digunakan untuk menggambarkan karakteristik respons struktur terhadap gempa.

Pembebanan gempa diambil dari hasil analisis spektrum respons dan mencerminkan tingkat percepatan, kecepatan, atau deformasi yang diharapkan pada berbagai periode struktur.

Pembebanan gempa yang diterapkan pada struktur didasarkan pada karakteristik respon spektrum, seperti percepatan puncak pada periode tertentu. Tidak dapat dipungkiri bahwa desain struktur memerlukan penentuan pembebanan gempa yang akurat. Respons spektrum desain membantu dalam menentukan pembebanan gempa yang mencerminkan tingkat keparahan gempa yang mungkin terjadi di lokasi tertentu. Kurva percepatan respon spektrum digunakan untuk menentukan faktor-faktor seperti percepatan puncak dan periode struktur. Pembebanan gempa diaplikasikan sesuai dengan karakteristik kurva percepatan respon spektrum yang cocok.

Penyesuaian Pembebanan Berdasarkan Periode Struktur: Pembebanan gempa seringkali disesuaikan berdasarkan periode struktur untuk memperhitungkan efek dinamis. Respons spektrum desain membantu dalam menentukan periode-struktur efektif yang diperlukan untuk analisis gempa.

Dengan memahami hubungan ini, insinyur dapat merancang struktur yang efektif dalam menanggapi pembebanan gempa yang mungkin terjadi. Proses ini melibatkan integrasi antara karakteristik respons spektrum dan aspek-aspek penting dari pembebanan gempa dalam analisis struktural.

### **4.3. Pengertian Respons Spektrum**

Respons spektra adalah grafik yang menggambarkan reaksi maksimum dari suatu sistem satu derajat kebebasan (single degree of freedom) terhadap suatu beban dinamis sebagai fungsi dari frekuensi alami dan damping rasio dari sistem tersebut. Reaksi ini dapat berupa percepatan, kecepatan dan

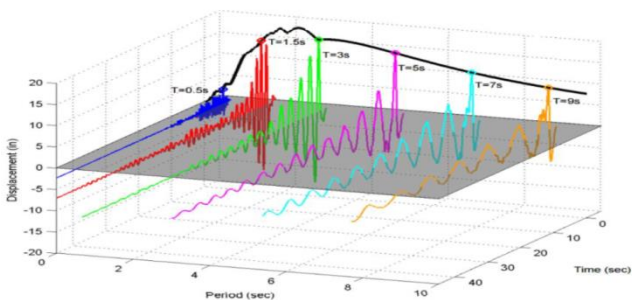
perpindahan. Dengan kata lain, respons spektra merupakan kurva yang memplot nilai-nilai maksimum dari respons struktur untuk semua kemungkinan sistem derajat kebebasan tunggal (Single Degree of Freedom - SDOF) akibat fungsi beban tertentu.

Respons spektra dapat juga digambarkan dalam bentuk tripartite spectrum yang mendeskripsikan reaksi maksimum percepatan, kecepatan dan perpindahan dalam satu grafik seperti yang diperkenalkan oleh Newmark dan Rosenblueth. Keuntungan dari bentuk tripartite spectrum adalah maksimum respon dari percepatan, kecepatan dan perpindahan dapat diketahui dalam keseluruhan rentang periode yang diinginkan. Untuk kebutuhan desain praktis, maka respon spektra desain dibuat dengan bentuk respon spektra yang telah dinormalisir dengan nilai percepatan maksimum di batuan dasar. Bentuk respon spektra didesain lebih sederhana agar lebih mudah dipakai dalam menentukan faktor beban gempa.

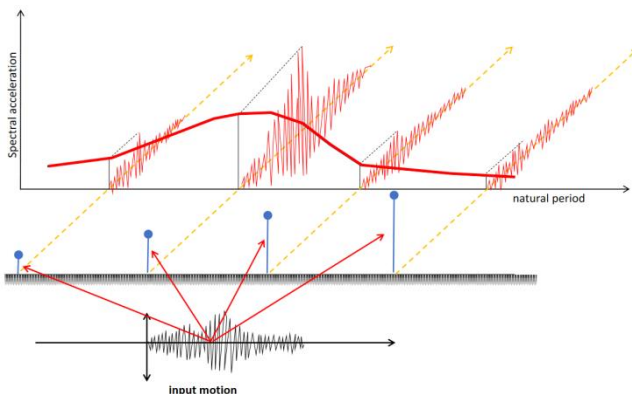
Spektrum respons dapat dihitung dengan menyelesaikan persamaan gerak sistem SDOF untuk nilai frekuensi alami dan rasio redaman yang berbeda, dan mengambil respons maksimum untuk setiap kasus. Alternatifnya, spektrum respons dapat diperoleh dari uji eksperimental atau simulasi numerik sistem SDOF di bawah gerakan tanah

Untuk kebutuhan praktis, maka spektrum respons percepatan dibuat dalam bentuk spektrum respons yang sudah disederhanakan. Tipikal/model spektrum respons gerakan tanah (GM) ini mewakili selubung respons puncak dari berbagai sistem derajat kebebasan tunggal (SDOF) dengan periode yang berbeda. Spektrum respons percepatan dari gerakan tanah (GM) adalah hubungan antara periode alami getaran sistem SDOF dan percepatan absolut maksimum yang dialaminya di bawah GM.

Oleh karena itu, konstruksi spektrum respons melibatkan analisis banyak sistem SDOF yang berbeda. Nilai setiap titik pada spektrum adalah respons puncak dari sistem derajat kebebasan tunggal pada periode tertentu, di mana hubungan antara respons puncak pada periode yang berbeda dan spektrum diilustrasikan secara grafis, seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.1 Hubungan antara respons puncak pada periode yang berbeda dengan spektrum.



Gambar 4.2 Hubungan antara respons puncak pada periode yang berbeda dengan spektrum.

Penentuan spektrum respons gempa merupakan langkah awal yang krusial dalam perencanaan bangunan tahan

gempa. Spektrum respons gempa memberikan gambaran tentang bagaimana percepatan, kecepatan, atau perpindahan bangunan bervariasi terhadap waktu selama gempa. Proses ini melibatkan beberapa tahapan:

- a. **Survei Geoteknik:**  
Survei geoteknik dilakukan untuk memahami karakteristik tanah di lokasi tersebut. Ini mencakup pengeboran tanah, pengujian kekuatan tanah, dan pemantauan kondisi tanah. Data ini sangat penting untuk menentukan respons gempa.
- b. **Pemantauan Seismik:**  
Pemantauan seismik melibatkan pengukuran getaran tanah yang mungkin terjadi selama gempa bumi. Stasiun seismik dipasang di lokasi strategis untuk merekam data seismik, yang kemudian digunakan untuk menganalisis karakteristik gempa.
- c. **Spektrum Respon Spektral Tanah (Ground Response Spectrum):**  
Data dari survei geoteknik dan pemantauan seismik digunakan untuk menghasilkan spektrum respon spektral tanah. Ini adalah kurva yang menggambarkan hubungan antara percepatan tanah dan periode waktu. Spektrum ini memberikan informasi tentang tingkat energi yang akan diterima oleh struktur pada berbagai periode getaran.
- d. **Pemilihan Akselerogram:**  
Akselerogram adalah catatan percepatan tanah selama gempa. Untuk menghasilkan spektrum respons gempa, diperlukan data akselerogram yang sesuai dengan karakteristik gempa di wilayah tersebut.
- e. **Analisis Dinamis:**  
Data spektrum respons gempa dan akselerogram digunakan dalam analisis dinamis untuk menilai respons struktural bangunan terhadap gaya gempa.

Analisis ini dapat melibatkan metode elemen hingga atau analisis dinamika struktural lainnya.

- f. Perhitungan Spektrum Respons Gempa Bangunan:  
Setelah mendapatkan spektrum respons gempa tanah, langkah selanjutnya adalah mengaplikasikannya pada struktur bangunan. Dengan menggunakan prinsip-prinsip dinamika struktural, insinyur dapat menghitung bagaimana struktur akan merespons terhadap spektrum respons gempa tersebut.
- g. Desain Struktural:  
Berdasarkan analisis, desain struktural dilakukan dengan memilih dimensi elemen struktural, pemilihan material, dan menentukan sambungan struktural. Prinsip-prinsip desain tahan gempa seperti ductility (keplastisan) dan redundancy (kelebihan) juga diperhitungkan.
- h. Iterasi dan Evaluasi:

Proses ini dapat melibatkan beberapa iterasi di mana desain disesuaikan dan dievaluasi kembali berdasarkan hasil analisis dinamis dan perubahan kondisi tanah atau parameter gempa lainnya. Proses ini juga memerlukan kerjasama antara ahli geoteknik, ahli seismik, dan insinyur struktural untuk menghasilkan perencanaan bangunan yang tahan gempa dengan mempertimbangkan karakteristik khusus dari lokasi tersebut.

#### **4.4. Disain Respons Spektrum Berdasarkan Code**

Desain respons spektrum dalam konteks rekayasa struktural mengacu pada penggunaan respons spektrum sebagai alat untuk merancang struktur bangunan agar tahan terhadap beban gempa. Code yang sering digunakan dalam disain respons spektrum adalah kode bangunan yang berlaku di wilayah tertentu, seperti International Building Code (IBC) di

Amerika Serikat atau Eurocode di Eropa. Indonesia sendiri menggunakan SNI 1726-2019.

Sebagai negara kepulauan yang terletak di daerah cincin api (ring of fire) dan juga negara seismik aktif, Indonesia secara konstan menghadapi risiko bencana gempa bumi dan vulkanik gunung api. Dengan kondisi tersebut, pemerintah Indonesia melalui instansi terkait selalu melakukan update terhadap peta gempa Indonesia. Sesuai dengan SNI 1726 – 2019, respons spektrum dibuat berdasarkan data tanah yang dapat diperoleh dari hasil penyelidikan ataupun dari peta gempa Indonesia. SNI 1726 – 2019 memberikan prosedur untuk menentukan pengaruh gempa rencana yang harus ditinjau dalam perencanaan dan evaluasi struktur bangunan gedung dan nongedung serta berbagai bagian dan peralatannya secara umum. Gempa rencana ditetapkan sebagai gempa dengan kemungkinan terlampaui besarnya selama umur struktur bangunan 50 tahun adalah sebesar 2 %.

Peta Wilayah Gempa Indonesia dibuat berdasarkan analisis probabilistik bahaya gempa (probabilistic seismic hazard analysis), yang telah dilakukan untuk seluruh wilayah Indonesiaberdasarkan data seismotektonik mutakhir yang tersedia saat ini. Data masukan untuk analisis pembuatan peta gempa adalah, lokasi sumber gempa, distribusi magnitudo gempa di daerah sumber gempa, fungsi perambatan gempa (atenuasi) yang memberikan hubungan antara gerakan tanah setempat, magnitudo gempa di sumber gempa, dan jarak dari tempat yang ditinjau sampai sumber gempa, serta frekuensi kejadian gempa per tahun di daerah sumber gempa. Sebagai daerah sumber gempa, ditinjau semua sumber gempa yang telah tercatat dalam sejarah.

Prosedur pembuatan respons spektrum dengan berdasarkan SNI 1726 2019 adalah sebagai berikut:

1. Menentukan parameter percepatan tanah ( $S_s$  &  $S_1$ ).  
 $S_s$  adalah parameter percepatan respons spektral MCE dari peta gempa pada periode pendek, redaman 5 persen, didefinisikan dalam SNI 1726 pada pasal 6.1.2, di mana MCE adalah gempa maksimum yang dipertimbangkan. Sedangkan  $S_1$  adalah parameter percepatan respons spektral MCE dari peta gempa pada periode 1 detik, redaman 5 persen; didefinisikan dalam SNI 1726: 2019 pada pasal 6.1.2. Nilai parameter ini dapat dilihat pada gambar 15 dan 16 di SNI 1726: 2019.
2. Menentukan klasifikasi situs/kelas lokasi ( $S_A - S_F$ )  
 Nilai klasifikasi ini dapat dilihat pada Tabel 5 SNI 1726:2019.

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	$\geq 100$
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 : 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 6.10.1)	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) - 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 $\bar{s}_u < 50$ kPa		

**CATATAN:** N/A = tidak dapat dipakai

3. Menentukan faktor koefisien situs ( $F_a$  &  $F_v$ )  
 Nilai faktor koefisien situs  $F_a$  dan  $F_v$  dapat dilihat pada Tabel 6 dan 7 SNI 1726:2019.

Tabel 6 – Koefisien situs,  $F_a$

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget ( $MCE_R$ ) terpetakan pada periode pendek, $T = 0,2$ detik, $S_v$					
	$S_v \leq 0,25$	$S_v = 0,5$	$S_v = 0,75$	$S_v = 1,0$	$S_v = 1,25$	$S_v \geq 1,5$
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 <sup>(a)</sup>					

**CATATAN:**

- (a) SS= Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik, lihat 6.10.1

Tabel 7 – 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 <sup>(a)</sup>					

**CATATAN:**

- (a) SS= Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik, lihat 6.10.1

4. Menentukan parameter respons spektra percepatan ( $S_{Ms}$  dan  $S_{M1}$ ).

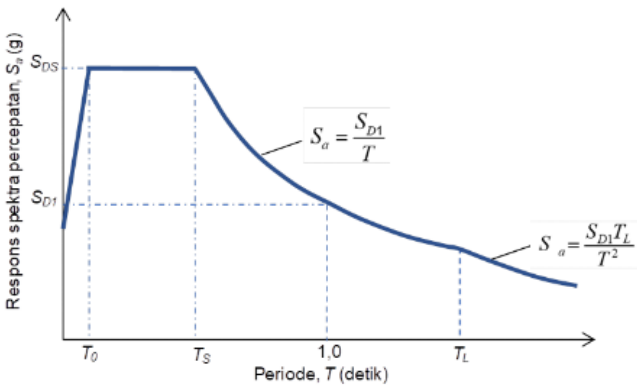
Nilai dari parameter respons spektra percepatan  $S_{Ms}$  dan  $S_{M1}$  dapat dilihat pada Pasal 6.2 SNI 1726:2019.  $S_{Ms}$  adalah parameter percepatan respons spektral MCE pada periode pendek yang sudah disesuaikan terhadap pengaruh kelas situs, seperti yang dilihat pada SNI 1726 2019 pasal 6.2. Sementara  $S_{M1}$  adalah percepatan percepatan respons spektral MCE pada periode 1 detik yang sudah disesuaikan terhadap pengaruh kelas situs, juga diterangkan pada SNI 1726:2019 pasal 6.2.

5. Menghitung nilai parameter percepatan spektral desain ( $S_{DS}$ -  $S_{D1}$ )

Nilai dari parameter percepatan spektral desain dapat dilihat pada Pasal 6.3 SNI 1726:2019.  $S_{DS}$  adalah

parameter percepatan respons spektral pada periode pendek, redaman 5 persen, sedangkan  $S_{D1}$  adalah parameter percepatan respons spektral pada periode 1 detik, redaman 5 persen. Keduanya baik  $S_{DS}$  dan  $S_{D1}$  didefinisikan dalam pasal 6.3 SNI 1726: 2019.

6. Menggambar Spektrum Respons Desain  
 Prosedur menggambar spektrum ini dapat dilihat pada pasal 6.4, dengan tipikal pola seperti pada Gambar 3 SNI 1726:2019.

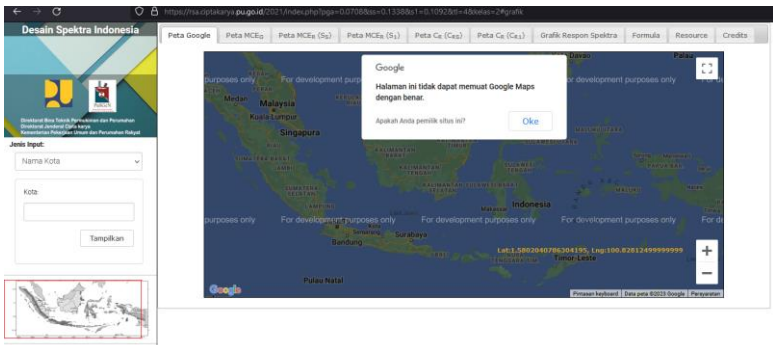


Gambar 4.3 Respons spektrum rencana

### Disain Respons Spektrum Berdasarkan Website

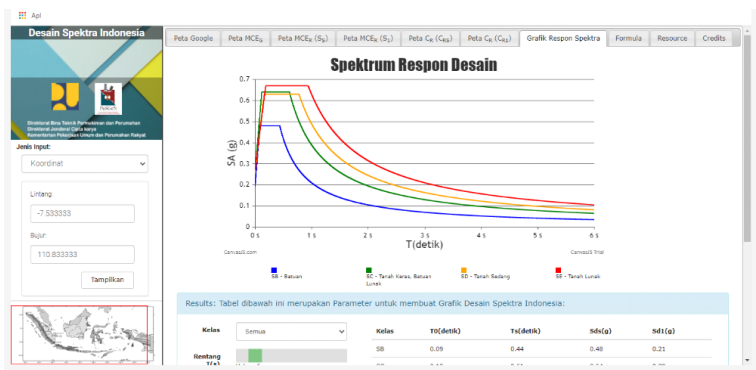
Adapun alur disain respons spektrum berdasarkan website atau situs pemerintah adalah sebagai berikut:

- Masuk pada alamat <http://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021>



Gambar 4.4 Tampilan situs

- Input nama kota atau koordinat kota.
- klik “Tampilkan” dan jangan lupa ubah “Kelas” dengan jenis tanah yang diketahui



Gambar 4.5 Tampilan hasil di situs

### Contoh Kasus

Pada contoh kasus ini, akan dibuatkan kurva respons spektrum untuk daerah Bukittinggi, dengan kondisi tanah lunak, yang akan digunakan nantinya untuk disain gedung perkantoran di kota tersebut.

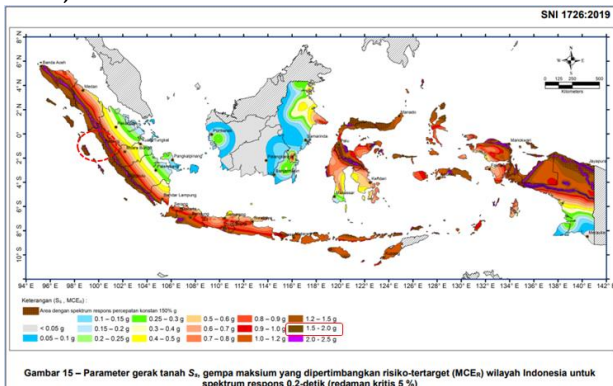
## A. Dengan menggunakan aturan SNI 1726:2019



Secara astronomis Kota Bukittinggi terletak antara  $00^{\circ}16' - 00^{\circ}20'$  LS dan  $100^{\circ}20' - 100^{\circ}25'$  BT dan memiliki luas wilayah 25,24 km<sup>2</sup>. Topografi permukaan bumi Kota Bukittinggi adalah berbukit-bukit dan berlembah dengan lapisan Tuff, terletak di ketinggian 780 – 950 meter di atas permukaan laut.

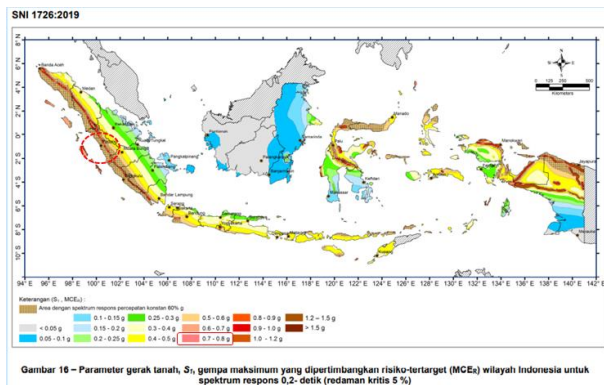
Prosedur yang dapat dikerjakan adalah:

1. Menentukan parameter percepatan tanah ( $S_s$  &  $S_1$ )  
Dapat dilihat pada SNI 1726: 2019 di Gambar 15 dan 16, hal. 231 dan 232



Berdasarkan lokasi Kota Bukittinggi pada gambar di atas, diketahui bahwa kota tersebut berwarna coklat gelap, dengan range nilai  $S_s$  adalah 1.5 sampai dengan 2.0 g., maka diambil nilai  $S_s$  sebesar 2.0g.

Kemudian berdasarkan warna, pada gambar di bawah ini, Kota Bukittinggi memiliki nilai  $S_1$  antara 0.7-0.8 maka diambil nilai terbesar yaitu 0.8.



2. Menentukan klasifikasi situs/kelas lokasi ( $S_A - S_F$ )  
 Berdasarkan Tabel 5 SNI 1726:2019, Kota Bukittinggi dengan jenis tanah yaitu tanah sedang sehingga termasuk kelas situs (SD).

Tabel 5 – Klasifikasi situs

Kelas situs	$\dot{v}_s$ (m/detik)	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{eb}$	$\bar{s}_u$ (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	$\geq 100$
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 :		
	1. Indeks plastistas, $PI > 20$ , 2. Kadar air, $w \geq 40\%$ , 3. Kuat geser niralir, $s_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus,yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 6.10.1)	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) - Lempung berplastistas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan indeks plastistas $PI > 75$ ) Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $\bar{s}_u < 50$ kPa		

CATATAN: N/A = tidak dapat dipakai

3. Menentukan faktor koefisien situs ( $F_a$  &  $F_v$ )  
 Dari Tabel 6 SNI 1726:2019, berdasarkan nilai  $S_s$  &  $S_1$  yang didapat, maka diperoleh nilai  $S_s = 2,0$  maka  $F_a = 1,0$

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	$SS^{(0)}$					

Sedangkan untuk  $F_v$ ,

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget ( $MCE_R$ ) terpetakan pada periode 1 detik, $S_1$					
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 = 0,5$	$S_1 \geq 0,6$
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	$SS^{(0)}$					

$S_1 = 0,8$  maka  $F_v = 1,7$

4. Menentukan parameter respons spektra percepatan ( $S_{MS}$  dan  $S_{M1}$ ) (Pasal 6.2 SNI 1726:2019).

Untuk penentuan respons spektral percepatan gempa MCER di permukaan tanah, diperlukan suatu faktor amplifikasi seismik pada periode 0,2 detik dan periode 1 detik. Faktor amplifikasi meliputi faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek ( $F_a$ ) dan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik ( $F_v$ ). Parameter respons disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs, harus ditentukan dengan perumusan berikut ini:

$$S_{MS} = F_a S_s$$

$$S_{M1} = F_v S_1$$

Keterangan:

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

$S_1$  = parameter respons spektral percepatan gempa MCER terpetakan untuk periode 1,0 detik.

Oleh karena itu, didapatkan  $S_{MS} = F_a \cdot S_s$   
 $S_{MS} = 1 \cdot 2,0 = 2,0$

Dan,

$$S_{M1} = F_v \cdot S_1$$
$$S_{M1} = 1,7 \cdot 0,8 = 1,36$$

5. Menentukan parameter  $S_{DS}$  dan  $S_{D1}$ .

Parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek,  $S_{DS}$  dan pada periode 1 detik,  $S_{D1}$ , harus ditentukan melalui perumusan berikut ini:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS}$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1}$$

Sehingga nilai  $S_{DS}$  dan  $S_{D1}$  adalah:

$$S_{DS} = 2/3 \cdot S_{MS}$$

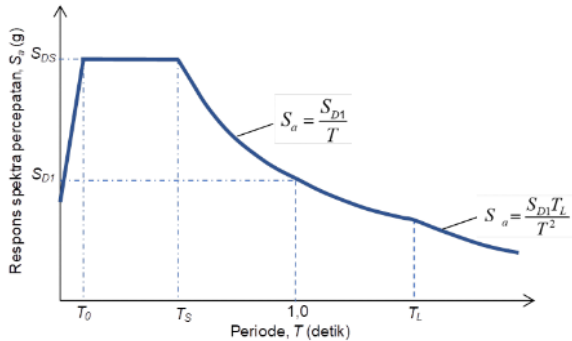
$$S_{DS} = 2/3 \cdot 2,0 = \underline{1,333}$$

$$S_{D1} = 2/3 \cdot S_{M1}$$

$$S_{D1} = 2/3 \cdot 1,36 = \underline{0,906}$$

6. Menentukan spektrum disain berdasarkan aturan SNI 1726:2019 pasal 6.4.

Bila spektrum respons desain diperlukan oleh tata cara ini dan prosedur gerak tanah dari spesifik-situs tidak digunakan, maka kurva spektrum respons desain harus dikembangkan dengan mengacu pada gambar dan ketentuan di bawah ini :



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

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

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

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T}$$

3. Untuk periode lebih besar dari  $T_S$  tetapi lebih kecil dari atau sama dengan  $T_L$ , respons spektral percepatan desain,  $S_a$ , diambil berdasarkan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2}$$

4. Untuk periode lebih besar dari  $T_L$ , respons spektral percepatan desain,  $S_a$ , diambil berdasarkan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2}$$

Keterangan:

$S_{DS}$  = parameter respons spektral percepatan desain pada periode pendek;

$S_{D1}$  = parameter respons spektral percepatan desain pada periode 1 detik;

$T$  = periode getar fundamental struktur.

$T_0$  =  $0.2 \times (SD1/SDS)$

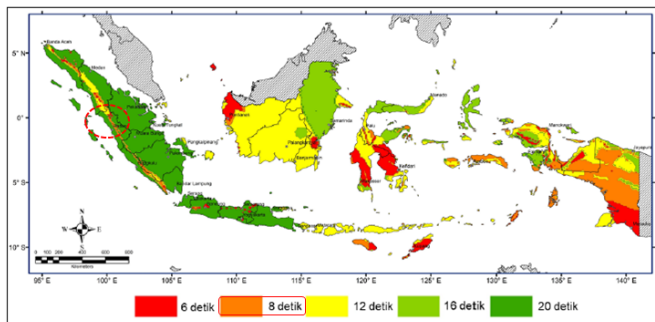
$T_S$  =  $SD1/SDS$

$T_L$  = Peta transisi periode panjang yang ditunjukkan pada Gambar 3 yang nilainya diambil dari Gambar 20 SNI 1726:2019

7. Menentukan Kurva Spektrum Respons Desain (Pasal 6.4 SNI 1726:2019)

a. Menentukan nilai  $T_L$

SNI 1726:2019



Gambar 20 – Peta transisi periode panjang,  $T_L$ , wilayah Indonesia

Dari gambar 20 di atas, diketahui kota Bukittinggi berwarna orange sehingga nilai  $T_L$  nya adalah 8 detik.

b. Menentukan nilai  $T_0$  dan  $T_S$

$$T_0 = 0,2 \cdot (Sd1/Sds)$$

$$T_0 = 0,2 \cdot (0,906/1,333)$$

$$T_0 = 0,136$$

$$T_S = (Sd1/Sds)$$

$$T_S = (0,906/1,333)$$

$$T_S = 0,680$$

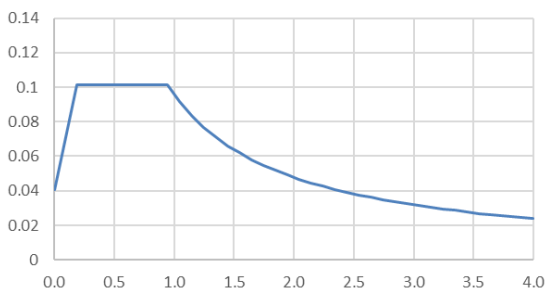
- c. Menentukan nilai  $S_a$   
 Nilai  $S_a$  didapat dengan menggunakan persamaan persamaan di prosedur 6.  
 Perhitungan dilakukan dengan spreadsheet excel.

$S_s$	2
$S_i$	0.800000
$F_a$	1.000000
$F_v$	1.700000
$S_{MS(g)}$	2
$S_{MI(g)}$	1.360000
$S_{DS(g)}$	1.333333333
$S_{DI(g)}$	0.906667
$T_0$	0.136000
$T_s$	0.680000
$T_L$	8

T (Detik)	T (Detik)	$S_a(g)$
0	0.000	0.533
$T_0$	0.136	1.333
$T_s$	0.680	1.333
$T_1$	0.78	1.162
	0.88	1.030
	0.98	0.925
	1.08	0.840
	1.18	0.768
	1.28	0.708
	1.38	0.657
	1.48	0.613
	1.58	0.574
	1.68	0.540
	1.78	0.509
	1.88	0.482
	1.98	0.458

2.08	0.436
2.18	0.416
2.28	0.398
2.38	0.381
2.48	0.366
2.58	0.351
2.68	0.338
2.78	0.326
2.88	0.315
2.98	0.304
3.08	0.294
3.18	0.285
3.28	0.276
3.38	0.268
4.00	0.227

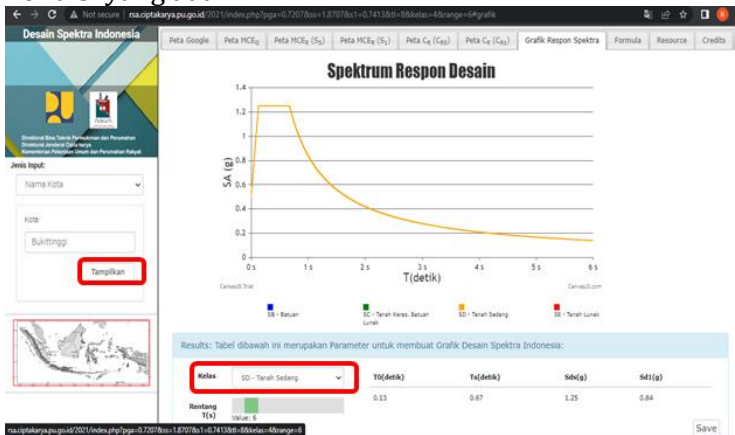
## 8. Menggambarkan respons spektrum Kota Bukittinggi



B. Dengan menggunakan website atau situs.

Website yang digunakan untuk analisa gedung adalah <http://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021>.

Pada tampilan di website akan diminta untuk memasukkan nama kota atau kordinat, dan jenis situs yang sesuai dengan kondisi yang ada.



#### 4.5. Tugas dan Latihan

Buatlah respons spektrum untuk beberapa daerah sesuai yang diminta, dan bandingkan dengan grafik yang dihasilkan dari situs. Daerah yang diminta adalah:

- Palu, tanah sedang
- Yogyakarta, tanah lunak
- Denpasar, tanah keras.

Tugas dibuat berkelompok, dan dipresentasikan serta didiskusikan di dalam kelas.

## *Bab 5*

# *Analisis Beban Gempa Dengan Metode Statik Ekuivalen*

### **5.1. Capaian Pembelajaran**

Capaian pembelajaran yang diharapkan pada mahasiswa adalah kemampuan untuk menganalisis beban gempa dengan menggunakan metode statik ekuivalen. Metode ini memerlukan beberapa langkah yang cukup sederhana bila dibandingkan dengan metode metode lainnya. Mahasiswa dikatakan mencapai target yang diharapkan apabila akumulasi nilai dari tugas memenuhi nilai minimal.

### **5.2. Relevansi**

Materi pada bab ini adalah mengenai salah satu metode yang dapat digunakan untuk analisis pembebanan pada gempa. Oleh karena itu keterkaitannya terhadap pemahaman mahasiswa sangatlah besar. Sebuah struktur dapat direncanakan dengan baik apabila beban beban yang terjadi kepadanya dapat diprediksi dengan baik pula.

Prosedur analisis yang paling sederhana dan yang langsung dapat digunakan untuk menentukan pengaruh dari beban gempa terhadap struktur bangunan adalah prosedur analisis statik. Analisis statik ekuivalen merupakan salah satu metode menganalisis struktur gedung terhadap pembebanan gempa

dengan menggunakan beban gempa nominal statik ekuivalen. Prosedur analisis statik ini hanyalah suatu cara pendekatan yang menirukan pengaruh dinamik dari beban gempa yang sesungguhnya.

Analisis statik hanya boleh dilakukan untuk struktur-struktur bangunan dengan bentuk yang sederhana dan beraturan atau simetris, yang tidak menunjukkan perbandingan yang menyolok dalam perbandingan antara berat dan kekakuan pada tingkat-tingkatnya.

Menurut peraturan pembebanan kegempaan, analisis statik ekuivalen dapat dilakukan pada gedung yang memiliki struktur beraturan. Struktur gedung ditetapkan sebagai struktur gedung beraturan, apabila memenuhi beberapa ketentuan.

Pada saat ini telah diterbitkan SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung (selanjutnya disebut SNI 1726:2019), namun pemberlakuan peraturan sebelumnya masih diperbolehkan sampai adanya pencabutan dan pernyataan tidak berlaku, sehingga peraturan sebelumnya tetap masih sering dipakai oleh praktisi.

### **5.3. Pengantar Umum**

Metode analisis yang dapat digunakan untuk memperhitungkan pengaruh beban gempa terhadap struktur adalah sebagai berikut :

1. Metode analisis statik.  
Metode ini menggunakan pembebanan statis, yang tentunya akan menghasilkan reaksi statis dari struktur. Yang dimaksud dengan pembebanan statis dalam hal ini adalah pembebanan yang tidak tergantung kepada

waktu, sehingga memerlukan proses yang tidak lama dan tidak rumit.

2. Metode analisis dinamis.

Metode analisis dinamis adalah metode yang paling baik digunakan pada struktur, terutama struktur yang memerlukan tingkat kewaspadaan yang tinggi terhadap kegagalan. Misalnya adalah struktur yang terletak di daerah rawan bencana, struktur yang memiliki tingkat ketidak beraturan yang besar, atau struktur dengan kepentingan publik yang tinggi.

Analisis beban gempa dengan metode statik ekuivalen adalah suatu pendekatan yang digunakan dalam rekayasa struktural untuk mengevaluasi respons struktur terhadap gempa dengan menyederhanakan gaya-gaya dinamis yang dihasilkan oleh gempa menjadi gaya-gaya statis setara. Metode ini sering digunakan untuk memahami dampak gempa pada struktur secara cepat dan efisien, terutama pada struktur yang tidak terlalu kompleks.

Analisis perancangan struktur bangunan terhadap pengaruh beban gempa secara statis, pada prinsipnya adalah menggantikan gaya-gaya horizontal yang bekerja pada struktur akibat pergerakan tanah dengan gaya-gaya statis yang ekuivalen, dengan tujuan penyederhanaan dan kemudahan di dalam perhitungan. Metode ini disebut Metode Gaya Lateral Ekuivalen (Equivalent Lateral Force Method). Pada metode ini diasumsikan bahwa gaya horizontal akibat gempa yang bekerja pada suatu elemen struktur, besarnya ditentukan berdasarkan hasil perkalian antara suatu konstanta berat atau massa dari elemen struktur tersebut.

## **Persyaratan untuk Metode Statik Ekuivalen**

Analisis statik ekuivalen merupakan metode analisis struktur dengan getaran gempa yang dimodelkan sebagai beban-beban horisontal statik yang bekerja pada pusat-pusat massa bangunan.

Pada aturan pembebanan kegempaan Indonesia dikatakan, bila nilai akhir respon dinamik tersebut dinyatakan dalam gaya geser dasar nominal, maka nilainya tidak boleh kurang dari 80% gaya geser dasar yang dihasilkan dari analisis statik ekuivalen. Karena analisis statik ekuivalen dipandang merupakan langkah awal dalam perencanaan gedung tahan gempa, maka penggunaan software analisa struktur diharapkan dapat membantu melakukan analisis statik ekuivalen, terutama dalam mendapatkan nilai angka massa dan waktu getar alami dari model struktur gedung yang ditinjau.

Menurut Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung (SNI 1726:2019), analisis statik ekuivalen dapat dilakukan pada gedung yang memiliki struktur beraturan. Ketentuan-ketentuan mengenai struktur gedung beraturan disebutkan dalam standar. Secara khusus dalam SNI 1726:2019 juga membahas masalah struktur gedung beraturan (regular) dan tidak beraturan (irregular).

Analisa ini memiliki batasan hanya diperuntukkan untuk gedung- gedung yang beraturan (regular), kekakuan tingkat-tingkat yang berdekatan tidak berbeda lebih dari 30%, kekuatan tingkat-tingkat yang berdekatan tidak berbeda lebih dari 20%, massa pada tingkat-tingkat yang berdekatan tidak berbeda lebih dari 50%.

Jika pembatasan diatas tidak dipenuhi, maka selain dilakukan analisis statik ekuivalen juga diperlukan analisis lebih lanjut yaitu analisis respon dinamik. Perhitungan respon dinamik struktur gedung tidak beraturan terhadap

pembebanan gempa, dapat menggunakan metode analisis ragam spektrum respons atau metode analisis respons dinamik riwayat waktu.

Secara singkat, dapat dikatakan kriteria dari gedung beraturan apabila memenuhi ketentuan sebagai berikut :

- a. Tinggi struktur gedung diukur dari taraf penjepitan lateral tidak lebih dari 10 tingkat atau 40 m.
- b. Denah struktur gedung adalah persegi panjang tanpa tonjolan dan walaupun mempunyai tonjolan, panjang tonjolan tersebut tidak melebihi 25% dari ukuran terbesar denah struktur gedung dalam arah tonjolan tersebut.
- c. Denah struktur tidak ada coakan sudut, kalau pun ada coakan sudut, panjang sisi coakan tersebut tidak melebihi 15% dari ukuran terbesar denah struktur gedung dalam arah sisi coakan tersebut.
- d. Sistem struktur gedung terbentuk oleh subsistem-subsistem penahan beban lateral yang arahnya saling tegak lurus dan sejajar dengan sumbu-sumbu utama ortogonal dengah struktur gedung secara keseluruhan.
- e. Sistem struktur gedung tidak menunjukkan loncatan bidang muka dan walaupun mempunyai loncatan bidang muka, ukuran dari denah struktur bagian gedung yang menjulang dalam masing-masing arah tidak kurang dari 75% dari ukuran terbesar denah struktur bagian gedung sebelah bawahnya. Dalam hal ini, struktur rumah atap yang tingginya tidak lebih dari 2 tingkat tidak perlu dianggap menyebabkan adanya loncatan bidang muka.
- f. Sistem struktur gedung memiliki kekakuan lateral yang beraturan, tanpa adanya tingkat lunak. Yang dimaksud dengan tingkat lunak adalah suatu tingkat, dimana kekakuan lateralnya adalah kurang dari 70% tingkat di atasnya atau kurang dari 80% kekakuan lateral rata-rata 3 tingkat di atasnya. Dalam hal ini, yang dimaksud

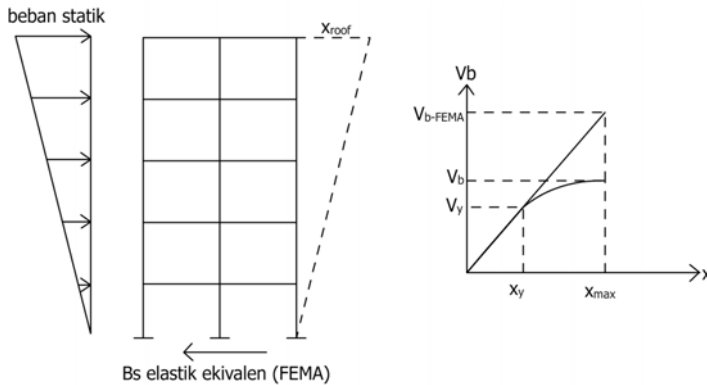
dengan kekakuan lateral suatu tingkat adalah gaya geser yang bila bekerja di tingkat itu menyebabkan satu satuan simpangan antar tingkat.

- g. Sistem struktur mempunyai berat lantai tingkat yang beraturan, artinya setiap lantai tingkat memiliki berat yang tidak melebihi 150% dari berat lantai tingkat di atasnya atau dibawahnya. Berat atap atau rumah atap tidak perlu memenuhi ketentuan ini.
- h. Sistem struktur gedung memiliki unsur-unsur vertikal dari sistem penahan beban lateral yang menerus, tanpa perpindahan titik beratnya, kecuali bila perpindahan tersebut tidak lebih dari setengah ukuran unsur dalam arah perpindahan tersebut.
- i. Sistem struktur gedung memiliki lantai tingkat yang menerus, tanpa lubang atau bukaan yang luasnya melebihi 50% dari luas lantai tingkat. Walaupun ada lantai tingkat dengan lubang atau bukaan seperti itu, jumlahnya tidak boleh melebihi 20% dari jumlah lantai tingkat seluruhnya.

Struktur yang tidak memenuhi ketentuan di atas dapat ditetapkan sebagai struktur gedung tidak beraturan. Perencanaan struktur gedung tidak beraturan tidak dapat menggunakan metoda statik ekuivalen, harus menggunakan metoda dinamik.

#### **5.4. Gaya Geser Dasar Seismik**

Geser dasar adalah perkiraan gaya lateral maksimum yang diharapkan pada dasar struktur akibat aktivitas seismik. Dengan kata lain, gaya geser dasar merupakan pengganti atau penyederhanaan dari getaran gempa bumi yang bekerja pada dasar bangunan dan selanjutnya digunakan sebagai gaya gempa rencana yang harus ditinjau dalam perencanaan dan evaluasi struktur bangunan gedung. Hal ini dihitung dengan menggunakan zona seismik, material tanah, dan persamaan gaya lateral kode bangunan.



Gambar 5.1 Prinsip analisis statik linier (berdasarkan FEMA-273)

Gaya geser dasar akibat gempa bumi, dalam arah yang ditetapkan harus ditentukan berdasarkan persamaan berikut:

$$V = C_s \cdot W$$

dengan :

$C_s$  adalah koefisien respon seismik

$W$  adalah berat seismik efektif

Besaran koefisien respon seismik,  $C_s$ , dapat dihitung sebagai berikut:

$$C_s = \frac{S_{DS}}{R} \cdot \frac{1}{I_e}$$

dengan :

$S_{DS}$  adalah parameter percepatan spektrum respon desain pada

periode pendek 0,2 detik

$R$  adalah faktor modifikasi respon

Ie adalah faktor keutamaan

Nilai Cs tidak perlu melebihi

$$S_{D1} / T \left( \frac{R}{I_e} \right)$$

Namun tidak boleh kurang dari:  $C_s = 0,044SDS I_e > 0,01$

Untuk struktur-struktur yang memiliki lokasi pada daerah dengan nilai S1 sama dengan atau lebih besar daripada 0,6g, maka Cs tidak boleh kurang daripada :

$$0.5S_1 / \left( \frac{R}{I_e} \right)$$

Berat seismik efektif struktur, W, harus menyertakan seluruh beban mati dan beban lainnya yaitu:

- a. Dalam daerah yang digunakan untuk penyimpanan: minimum sebesar 25 persen beban hidup lantai (beban hidup lantai di garasi publik dan struktur parkir terbuka, serta beban penyimpanan yang tidak melebihi 5 persen dari berat seismik efektif pada suatu lantai, tidak perlu disertakan).
- b. Jika ketentuan untuk partisi disyaratkan dalam disain beban lantai: diambil sebagai yang terbesar di antara berat partisi aktual atau berat daerah lantai minimum sebesar 0,48 kN/m<sup>2</sup>.
- c. Berat operasional total dari peralatan yang permanen.
- d. Berat lansekap dan beban lainnya pada taman atap dan luasan sejenis lainnya

Gaya geser dasar seismik yang telah dihitung, selanjutnya didistribusikan ke semua tingkat menjadi gaya gempa lateral (Fx) yang besarnya ditentukan sebagai berikut:

$$F_x = C_{vx} V$$

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k}$$

dengan :

$C_{vx}$  adalah faktor distribusi vertikal  $V$  adalah gaya geser dasar seismik

$w_i, w_x$  adalah bagian berat seismik efek total struktur ( $W$ ) yang dikenakan pada tingkat  $i$  atau  $x$   $h_i$ ,

$h_x$  adalah tinggi dari dasar sampai tingkat  $i$  atau  $x$   $k$  adalah eksponen yang terkait dengan periode struktur, ditentukan sebagai berikut :

- = 1, untuk struktur dengan  $T < 0,5$  detik
- = 2, untuk struktur dengan  $T > 2,5$  detik
- = 2, atau dilakukan interpolasi linier antara 1 dan 2, untuk  $0,5 < T < 2,5$

Selanjutnya pada setiap elemen vertikal sistem penahan gaya seismik di tingkat yang ditinjau harus didistribusikan geser tingkat desain gempa ( $V_x$ ) yang besarnya adalah :

$$V_x = \sum_{i=x}^n F_i$$

## 5.5. Simpangan Antar Lantai

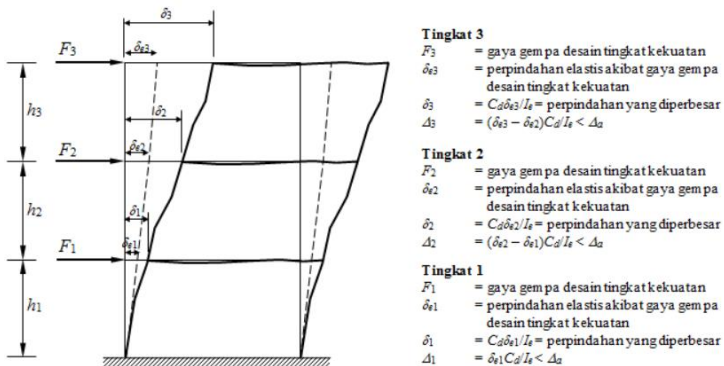
Setelah gaya gempa statik ekuivalen sudah didapatkan, maka struktur dianalisa lebih lanjut sesuai dengan konsep konsep disain dan analisis struktur. Dalam proses perencanaan struktur, maka simpangan lateral antar lantai tingkat (story drift) harus selalu diperiksa untuk menjamin stabilitas struktur, mencegah kerusakan elemen-elemen non struktural, serta untuk menjamin kenyamanan pengguna bangunan.

Penentuan simpangan antar lantai tingkat desain (D) harus dihitung sebagai perbedaan defleksi pada pusat massa di tingkat teratas dan terbawah yang ditinjau. Defleksi pusat massa di tingkat  $x$  ( $\delta_x$ ) harus dihitung sesuai persamaan berikut:

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{I_e}$$

Dengan :

- $C_d$  adalah faktor pembesaran defleksi (lihat Tabel 15.8)
- $\delta_{xe}$  adalah defleksi pada lokasi lantai yang ditinjau yang diakibatkan gaya gempa lateral
- $I_e$  adalah faktor keutamaan struktur



Gambar 5.2 Perhitungan gaya antar lantai

Simpangan antar lantai tingkat desain (D) tidak boleh melebihi simpangan antar lantai tingkat ijin ( $D_a$ ) seperti ditentukan dalam Tabel berikut ini.

Struktur	Kategori Resiko		
	I atau II	III	IV
Struktur, selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar lantai tingkat	0,025 $h_{zx}$	0,020 $h_{zx}$	0,015 $h_{zx}$
Struktur dinding geser kantilever batu bata	0,010 $h_{zx}$	0,010 $h_{zx}$	0,010 $h_{zx}$
Struktur dinding batu bata lainnya	0,007 $h_{zx}$	0,007 $h_{zx}$	0,007 $h_{zx}$
Semua struktur lainnya	0,020 $h_{zx}$	0,015 $h_{zx}$	0,010 $h_{zx}$

$h_{zx}$  adalah tinggi tingkat di bawah tingkat  $x$ .

Untuk sistem penahan gaya seismik yang terdiri dari hanya rangka momen pada struktur yang dirancang untuk Kategori Disain Seismik D, E, atau F, simpangan antar lantai tingkat disain (D) tidak boleh melebihi  $D_a/r$  untuk semua tingkat. Nilai  $r$  harus ditentukan sebesar 1,3.

Pengaruh  $P-\Delta$  pada geser dan momen tingkat, gaya dan momen elemen struktur yang dihasilkan dan simpangan antar lantai tingkat yang timbul oleh pengaruhnya, tidak disyaratkan untuk diperhitungkan apabila koefisien stabilitas ( $\theta$ ) sama dengan atau kurang dari 0,1.

## 5.6. Prosedur dalam Metode Statik Ekuivalen

Berikut adalah langkah-langkah umum dalam analisis struktur tahan gempa dengan metode statik ekuivalen.

- a. Pemilihan Peta Gempa:
 

Pilih peta gempa yang sesuai dengan lokasi proyek. Peta gempa memberikan informasi tentang percepatan gempa dan karakteristik gempa di suatu wilayah.
- b. Penetapan Beban Gempa:
 

Terapkan beban gempa pada struktur sesuai dengan nilai percepatan gempa yang terkandung dalam peta gempa. Beban ini dapat diaplikasikan sebagai gaya statis setara pada struktur.
- c. Penyederhanaan Struktur:
 

Sederhanakan struktur kompleks menjadi model yang lebih sederhana yang dapat diwakili oleh

elemen-elemen statis seperti batang-batang dan simpul-simpul.

- d. Analisis Statis:  
Gunakan prinsip-prinsip keseimbangan dan persamaan keseimbangan statis untuk menentukan respons struktur terhadap gaya gempa statis yang diaplikasikan.
- e. Penentuan Gaya dan Momen Statik Ekuivalen:  
Tentukan gaya dan momen statik ekuivalen yang mewakili efek keseluruhan dari gaya gempa yang diterapkan. Gaya ini kemudian digunakan untuk menganalisis respons struktur secara statis.
- f. Perhitungan Respons Struktural:  
Hitung respons struktural terhadap gaya dan momen statis ekuivalen menggunakan metode analisis statis biasa, seperti metode elemen hingga atau metode elemen tak hingga
- g. Check kelayakan struktur  
Evaluasi keselamatan struktur dengan membandingkan respons struktural dengan kapasitas strukturalnya, seperti gaya internal, momen, dan deformasi.

Meskipun metode statik ekuivalen dapat memberikan hasil yang cepat, perlu dicatat bahwa ini adalah pendekatan kasar dan dapat memiliki keterbatasan dalam menggambarkan respons dinamis sebenarnya dari struktur terhadap gempa. Oleh karena itu, pada proyek-proyek yang lebih signifikan atau kompleks, seringkali disarankan untuk menggunakan metode analisis dinamis yang lebih canggih, seperti analisis respons spektrum atau analisis waktu-dinamis.

### **Contoh Kasus**

Diketahui sebuah proyek dengan data sebagai berikut:

- a. Nama Proyek : Pembangunan Gedung Kantor

b. Lokasi Proyek : Kota Padang, Sumatera Barat

c. Data Jumlah dan Fungsi Lantai

Lantai	Tinggi Lantai (m)	Elevasi (m)	Fungsi Lantai
Lt. 5	4.00	+16.00	Kantor
Lt. 4	4.00	+12.00	Kantor
Lt. 3	4.00	+8.00	Kantor
Lt. 2	4.00	+4.00	Kantor
Lt. 1	0.00	+0.00	Kantor

d. Data Material Struktur

Beton ( $f_c'$ ) : 25,4 MPa

$E_c$  :  $4700\sqrt{f_c'}$

Baja : BJTS420B ;  $f_y=420$  Mpa

e. Sistem Struktur : SRPMK

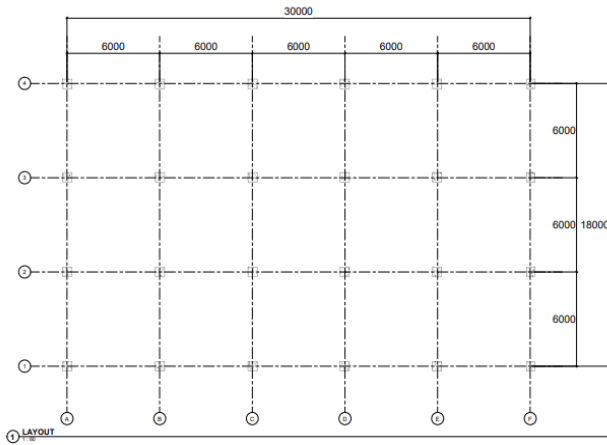
f. Berdasarkan Tabel 12 SNI 1726:2019 nilai

$R=8$ ;  $\Omega=3$ ;  $C_d=5,5$

Perencanaan struktur bangunan ini berdasarkan peraturan, standar dan ketentuan yang berlaku di Indonesia, yaitu:

- Tata Cara Perencanaan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung (SNI 2847-2019).
- Perencanaan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung (SNI -1726-2019).
- Beban desain minimum untuk perencanaan bangunan gedung dan struktur lain (SNI - 1727-2020).

Denah bangunan dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



① TAMPAK 3D

## 5.7. Perhitungan Berat Seismik Efektif Bangunan

Perhitungan berat seismik sesuai SNI 1726:2019 Pasal 7.7.2.

### 7.7.2 Berat seismik efektif

Berat seismik efektif struktur,  $W$ , harus menyertakan seluruh beban mati dan beban lainnya yang terdaftar di bawah ini:

1. Dalam daerah yang digunakan untuk penyimpanan: minimum sebesar 25 % beban hidup lantai

#### PENGECEUALIAN

- a. Bila beban penyimpanan tidak lebih dari 5 % terhadap berat seismik efektif pada tingkat tersebut, beban tidak perlu dimasukkan dalam berat seismik efektif.
  - b. Beban hidup lantai di tempat parkir umum dan struktur parkir terbuka tidak perlu dimasukkan.
2. Jika ketentuan desain beban lantai untuk partisi disyaratkan SNI 1727 pasal 4.3.2, sebesar beban terbesar antara berat partisi aktual atau berat daerah lantai minimum sebesar 0,48 kN/m<sup>2</sup>;
  3. Berat operasional total dari peralatan yang permanen;
  4. Berat lanskap dan beban lainnya pada taman atap dan area sejenis.

## Perhitungan berat seismik efektif ( $W$ )

### Data Struktur

Panjang bangunan	=	30	m
Lebar bangunan	=	18	m
Jumlah portal arah memanjang	=	3	
Jumlah portal arah melintang	=	5	
Tinggi kolom lantai 2 s/d 5	=	4	m
Tinggi kolom lantai 1	=	0	m
Panjang total balok tiap lantai	=	204	m
Jumlah kolom	=	24	
Dimensi kolom	=	0.5	x 0.5
Dimensi balok	=	0.3	x 0.5
Tebal pelat	=	0.12	m
Berat volume beton	=	2400	kg/m <sup>3</sup>
Berat dinding	=	250	kg/m <sup>2</sup>
Berat plafond	=	11	kg/m <sup>2</sup>

Berat spesi	=	21	kg/m <sup>2</sup>
Berat keramik	=	24	kg/m <sup>2</sup>
Berat Mekanikal/Elektrikal	=	25	kg/m <sup>2</sup>

**Berat lantai 5 (W5) =**  
**536460 kg**

- Pelat	=	30x	18	:	0.12	x	2400
- Balok	=	0 x	0.5	:	204	x	2400
			.				3
- Kolom x 24 bh	=	0 x	0.5	:	4.0	x	2400
			.				5
- Dinding	=	2 x	4.0	:	250		
			0				4
- Plafond	=	30x	18	:	11		
- Spesi	=	30x	18	:	21		
- Keramik	=	30X	18	:	24		
- M/E	=	30x	18	:	25		

---

Berat lantai 4 (W4) = Berat lantai 3 (W3) = Berat lantai 2 (W2) = berat lantai 5 (W5)

Berat lantai 1 (W1=0)

$$\begin{aligned} \text{Berat total (W)} &= 4 \times 536460 \text{ kg} &= 2145840 \text{ kg} \\ &&= 21458,4 \text{ kN} \end{aligned}$$

## 5.8. Menghitung Koefisien Respons Seismik

Berdasarkan pasal 7.8.1.1 SNI 1726:2019

$$C_s = S_{DS}/(R/I_e) = 0,752/(8/1) = 0,094$$

Cs tidak perlu melebihi nilai ini:

$$C_{smax} = S_{D1}/(T(R/I_e)) = 0,8/(0,78(8/1)) = 0,128$$

Cs tidak kurang dari nilai berikut:

$$C_{smin} = 0,044 \times S_{DS} \times I_e = 0,044 \times 0,752 \times 1 = 0,033$$

Sehingga, nilai Cs yang digunakan untuk arah sumbu-X dan sumbu-Y adalah 0,094.

## Perhitungan Gaya Geser Dasar

Gaya geser dasar dihitung sesuai SNI 1726:2019 pasal 7.8.1. Karena nilai Cs dalam arah sumbu-X dan sumbu-Y sama, maka nilai V sama untuk kedua arah sumbu.

$$\begin{aligned} V &= C_s \times W \\ &= 0,094 \times 21458,4 \text{ kN} \\ &= 2017,9 \text{ kN} \end{aligned}$$

## 5.9. Perhitungan Gaya Lateral Perlantai

Dari peta respon spektral parameter percepatan gempa dengan 2% kemungkinan terlampaui dalam kurun waktu 50 tahun dan redaman 5% (SNI 03-1726-2019) untuk tanah lunak dengan periode 0.2 detik diperoleh  $S_s = 1.2 \text{ g}$  dan parameter respon spektral percepatan gempa untuk 1 detik  $S_1 = 0.6 \text{ g}$ . Faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek ( $F_a$ ) = 0.94 (Tabel 6 SNI 03-1726-2019) dan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik ( $F_v$ ) = 2.0 (Tabel 7 SNI 03-1726-2019) maka,

$$S_{MS} = F_a S_s = 0.94 \times 1.2 \text{ g} = 1.128 \text{ g}$$

$$S_{M1} = F_v S_1 = 2.0 \times 0.6 \text{ g} = 1.2 \text{ g}$$

$$S_{DS} = 2/3 S_{MS} = 2/3 \times 1.128 \text{ g} = 0.752 \text{ g}$$

$$S_{D1} = 2/3 S_{M1} = 2/3 \times 1.2 \text{ g} = 0.8 \text{ g}$$

Kategori desain seismik berdasarkan parameter respon percepatan pada perioda pendek 0.2 detik (SDS) adalah termasuk kategori desain seismik D (Tabel 8 SNI 03-1726-2019). Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada perioda 1 detik (SD1) adalah termasuk kategori desain seismik D (Tabel 9 SNI 03-1726-2019). Sehingga kategori desain seismik berdasarkan nilai  $S_{DS}$  dan  $S_{D1}$  adalah D.

Hitung periode fundamental pendekatan ( $T_a$ )

$$T_a = C_t h_n^x$$

$$C_t = 0.0466 \text{ (Tabel 18 SNI 03-1726-2019)}$$

$$x = 0,9 \text{ (Tabel 18 SNI 03-1726-2019)}$$

$$h_n = 16 \text{ m}$$

$$T_a = 0.565 \text{ detik}$$

$$S_{D1} = 0.8 \text{ detik} > 0,4 \text{ detik maka } C_u = 1,4 \text{ ((Tabel 17 SNI 03-1726-2019))}$$

$$T_{max} = C_u T_a = 0.791 \text{ detik}$$

Sebagai alternatif, diizinkan untuk menentukan periode fundamental pendekatan ( $T_a$ ) dalam detik, dari persamaan berikut untuk struktur dengan ketinggian tidak melebihi 12 tingkat dimana sistem pemikul gaya seismik terdiri dari rangka pemikul momen yang seluruhnya beton atau seluruhnya baja dan rata-rata tinggi tingkat sekurang-kurangnya 3 m.

$$T_a = 0,1N \text{ dengan } N = \text{jumlah tingkat} = 5, \text{ sehingga } T = 0.1 \times 5 = 0,5 \text{ detik}$$

Digunakan nilai  $T = 0.791$  detik

### 5.10. Perhitungan Gaya Geser Seismik (V)

Berdasarkan pasal 7.8.1.1 SNI 1726:2019

$$C_s = S_{DS}/(R/I_e) = 0,752/(8/1) = 0,094$$

$C_s$  tidak perlu melebihi nilai ini:

$$C_{smax} = S_{D1}/(T(R/I_e)) = 0,8/(0,78(8/1)) = 0,128$$

$C_s$  tidak kurang dari nilai berikut:

$$C_{smin} = 0,044 \times S_{DS} \times I_e = 0,044 \times 0,752 \times 1 = 0,033$$

Sehingga, nilai  $C_s$  yang digunakan adalah 0,094.

$$F_x = C_{vx}V$$

$$V = C_s W$$

$$C_s = 0.094$$

$$W = 21458,4 \text{ kN}$$

$$V = 0,094 \times 21458,4 \text{ kN}$$

$$V = 2017,9 \text{ kN}$$

Gaya seismik lateral  $F_x$  di sebarang tingkat harus ditentukan dari persamaan berikut:

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k}$$

dimana,

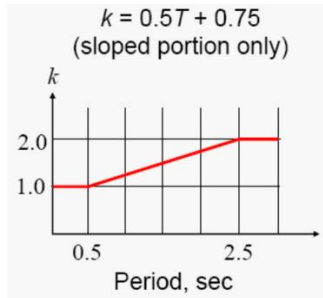
$C_{vx}$  = faktor distribusi vertikal,

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

$w_i$  dan  $w_x$  = bagian berat seismik 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 perioda struktur sebagai berikut:



- untuk struktur yang mempunyai  $T \leq 0,5$  detik  $k = 1$
- untuk struktur yang mempunyai  $T \geq 2,5$  detik  $k = 2$
- untuk struktur yang mempunyai  $0,5 < T < 2,5$  detik,  $k$  ditentukan dengan interpolasi linier antara point 1 dan 2 di atas

Sehingga untuk  $T = 0,791$  detik maka

$$\frac{0.791 - 0.5}{2.5 - 0.5} = \frac{k - 1}{2 - 1}$$

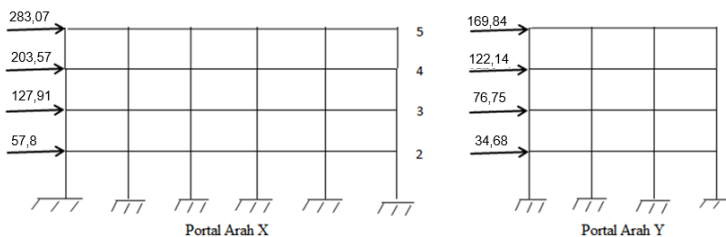
$$k = 1.146$$

### 5.11. Gaya lateral gempa tiap lantai

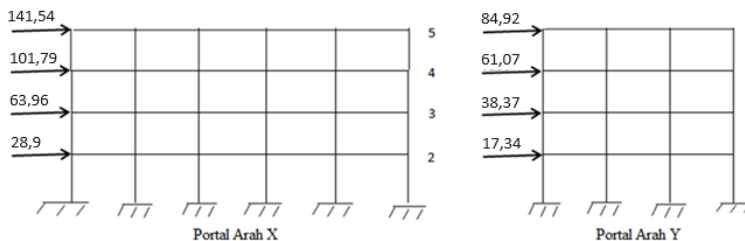
Portal dibagi menjadi portal exterior dan interior karena adanya perbedaan massa dari keduanya. Pada kasus ini, portal exterior mendapatkan gaya lateral setengah dari portal interior.

Lantai ke $i$	$h_i$ (m)	$h_i^k$	$w_i$ (kN)	$w_i h_i^k$	$C_v$	$F_{ix-y}$ (kN)	Tiap portal(kN)	
							$F_{ix} = (F_{ix-y})/3$	$F_{iy} = (F_{ix-y})/3$

								$v)/5$
5	16,00	23.984	5364,6	128664,5 3	0,42	849,22	283,07	169,84
4	12,00	17.248	5364,6	92529,25	0,30	610,72	203,57	122,14
3	8,00	10.838	5364,6	58140,46	0,19	383,74	127,91	76,75
2	4,00	4.897	5364,6	26272,30	0,09	173,40	57,80	34,68
1	0,00	0	0	0	0	0	0	0
$\Sigma$			21458,4	305606, 55				



Distribusi gaya lateral pada portal interior



Gambar Distribusi gaya lateral pada portal eksterior

### **5.12. Tugas dan Latihan**

Hitung dan analisis lah pembebanan gempa dengan metode statik ekuivalen untuk struktur 4 lantai, dengan fungsi adalah sebagai hotel atau apartemen. Denah dan dimensi struktur dapat dicari atau ditentukan sendiri (memenuhi aspek kelayakan struktur). Tugas dibuat berkelompok (3 orang) dan akan dipresentasikan dan didiskusikan di dalam kelas.

## *Bab 6*

# *Analisis Beban Gempa Dengan Metode Respons Spektrum*

### **6.1. Capaian Pembelajaran**

**C**apaian pembelajaran yang diharapkan pada bab ini adalah mahasiswa mampu melakukan analisis beban gempa untuk struktur dengan metode respons spektrum ini. Mahasiswa dapat memahami apa saja langkah yang akan dilakukan untuk analisa pembebanan gempa dengan metode respons spektrum ini.

#### **Relevansi**

Analisis pembebanan seismic pada struktur yang memiliki kondisi tidak terlalu sederhana, tidak cukup dilakukan dengan metode statik ekuivalen. Untuk itu diperlukan metode lain yang lebih kompleks, dengan mengakomodir percepatan gempa. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah metode respons spektrum. Dengan demikian, sangat jelas keterkaitan antara bab ini dengan mata kuliah yang diajarkan.

## 6.2. Pengantar Umum

Analisis dinamis untuk perancangan struktur tahan gempa dilakukan jika diperlukan evaluasi yang lebih akurat dari gaya-gaya gempa yang bekerja pada struktur, serta untuk mengetahui perilaku dari struktur akibat pengaruh gempa. Pada struktur bangunan tingkat tinggi atau struktur dengan bentuk atau konfigurasi yang tidak teratur.

Analisis dinamis dapat dilakukan dengan cara elastis maupun inelastis. Pada cara elastis terdiri dari analisis ragam riwayat waktu (time history modal analysis) dimana pada cara ini diperlukan rekaman percepatan gempa, dan analisis ragam spektrum respons (response spectrum modal analysis), dimana pada cara ini respons maksimum dari tiap ragam getar yang terjadi didapat dari spektrum respons Rencana (design spectra). Sedangkan pada analisis dinamis inelastis digunakan untuk mendapatkan respons struktur akibat pengaruh gempa yang sangat kuat dengan cara integrasi langsung (direct integration method).

Metode respons spektrum adalah analisis gaya gempa dengan suatu model matematis dari struktur bangunan dengan memberlakukan spectrum gempa rencana melalui superposisi dari respon masing masing. Metode spektrum respons didasarkan pada asumsi bahwa respons sistem multi-derajat kebebasan (MDOF) dapat diperkirakan dengan superposisi respons beberapa sistem SDOF, yang masing-masing mewakili mode getaran sistem MDOF. Respon modal diperoleh dengan mengalikan faktor partisipasi modal, yang bergantung pada distribusi massa dan kekakuan struktur, dengan nilai spektrum respons yang sesuai dengan frekuensi modal dan rasio redaman. Respon total kemudian diperoleh dengan menjumlahkan respon modal, baik secara linier maupun nonlinier, bergantung pada tingkat deformasi dan nonlinier struktur.

Dalam perkembangan lebih lanjut didapatkan bahwa semakin tinggi nomor ragamnya maka faktor partisipasi ragamnya nya akan semakin kecil. Sehingga dapat disimpulkan bahwa respons suatu struktur hanya ditentukan oleh respon beberapa ragam pertama saja, yang umumnya diambil adalah sampai ragam ke-5, karena pada ragam yang selanjutnya nilai sudah sangat kecil sehingga dapat diabaikan.

Dalam perencanaan bangunan tahan gempa, pada umumnya tidak perlu diketahui respon struktur sebagai fungsi dari waktu. Biasanya cukup diketahui respon maksimum suatu struktur selama gempa berlangsung, yaitu ditulis sebagai :

$$\{x_{\max}\} = \{\phi\}_1 g_1 S_{d1} + \{\phi\}_2 g_2 S_{d2} + \dots$$

$$\{\dot{x}_{\max}\} = \{\phi\}_1 g_1 S_{v1} + \{\phi\}_2 g_2 S_{v2} + \dots$$

$$\{\ddot{x}_{\max}\} = \{\phi\}_1 g_1 S_{a1} + \{\phi\}_2 g_2 S_{a2} + \dots$$

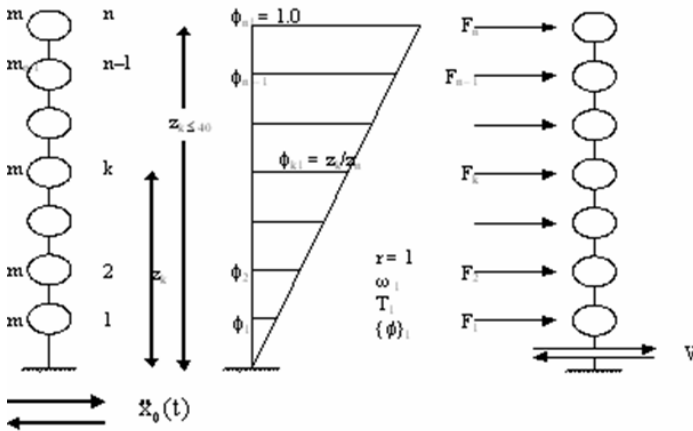
dimana  $S_d$ ,  $S_v$  dan  $S_a$  adalah nilai-nilai maksimum dari respon displacemen, velocity, dan akselerasi dari sistem dengan satu derajat kebebasan pada saat bersamaan.

Respon ragam yang pertama adalah sangat dominan untuk gedung yang tingginya kurang dari 40 m, dengan waktu getar alaminya  $T_1=1,5$  detik, sehingga partisipasi ragam-ragam lainnya dapat diabaikan. Selanjutnya dengan hanya meninjau respon ragam yang pertama ini, bentuk ragam dapat disederhanakan menjadi garis lurus dengan simpangan nol pada dasar dan satu pada puncak.

Dalam menentukan simpangan, kecepatan, dan percepatannya sebagai struktur yang berperilaku elastik linier akibat gempa, model struktur berderajat kebebasan banyak tersebut dapat dikonversikan menjadi model struktur berderajat kebebasan tunggal dengan melihat

faktor partisipasi modal yang diaplikasikan pada spektrum respon model struktur dengan derajat kebebasan tunggal.

Nilai partisipasi modal dan perpindahan nodal sesuai ragam getar yang ditinjau dapat ditentukan.  $S_d$ ,  $S_v$ , dan  $S_a$  adalah nilai deformasi (simpangan, kecepatan, dan percepatan) maksimum yang diperoleh dari pembacaan spektrum respon sistem berderajat kebebasan satu, dengan nilai perioda alami yang bersesuaian dengan dengan model struktur berderajat kebebasan banyak tersebut.



Gambar 6.1 Bentuk ragam pertama yang disederhanakan untuk struktur gedung dengan ketinggian kurang dari 40 m

Kode dan standar yang berbeda, seperti ASCE 7, Eurocode 8, atau IS 1893, menetapkan aturan dan prosedur berbeda untuk menerapkan metode spektrum respons pada desain dan analisis struktur. Hal ini mencakup pemilihan karakteristik gerakan tanah, seperti intensitas, durasi, dan kandungan frekuensi, definisi bentuk spektrum respon dan nilai redaman, perhitungan faktor partisipasi modal dan aturan kombinasi modal, dan pertimbangan dampaknya. interaksi tanah-struktur, torsi, dan mode yang lebih tinggi.

Salah satu perbedaan utama antara metode dan kode spektrum respons yang berbeda adalah bentuk kurva spektrum respons, yang mencerminkan kandungan frekuensi gerakan tanah dan pengaruhnya terhadap respons struktural. Bentuk spektrum respon dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti mekanisme sumber, jarak dari pusat gempa, kondisi lokasi, dan arah gerak. Kode dan standar yang berbeda menggunakan metode yang berbeda untuk menentukan bentuk spektrum respons, seperti rumus empiris, faktor amplifikasi spektral, atau ordinat spektral.

Bentuk spektrum respons juga mempengaruhi percepatan spektral desain (SDS) dan perpindahan spektral desain (SDD), yang digunakan untuk menentukan gaya seismik dan perpindahan untuk sistem struktur dan tingkat kinerja seismik yang berbeda. Perbedaan penting lainnya antara metode dan kode spektrum respons yang berbeda adalah nilai redaman yang diasumsikan untuk sistem SDOF dan sistem MDOF. Nilai redaman mempengaruhi amplitudo dan fase kurva spektrum respon, serta aturan kombinasi modal. Kode dan standar yang berbeda menggunakan nilai redaman yang berbeda, mulai dari 2% hingga 10%, bergantung pada jenis struktur, tingkat kegempaan, dan tujuan kinerja. Beberapa kode dan standar juga mengizinkan nilai redaman yang bervariasi, bergantung pada rentang frekuensi atau mode getaran.

Nilai redaman biasanya dinyatakan dalam persentase redaman kritis, yaitu redaman minimum yang diperlukan untuk mencegah osilasi sistem SDOF. Namun, kode dan standar yang berbeda menggunakan definisi redaman kritis yang berbeda, seperti redaman Rayleigh, redaman modal, atau redaman viskos yang setara. Oleh karena itu, penting untuk memeriksa kompatibilitas dan konsistensi nilai redaman yang digunakan dalam metode dan kode spektrum respons yang berbeda.

Perbedaan terakhir antara metode dan kode spektrum respon yang berbeda adalah aturan kombinasi modal yang digunakan untuk mendapatkan respon total sistem MDOF dari respon modal. Aturan kombinasi modal bergantung pada derajat korelasi dan interaksi antar mode, serta tingkat nonlinier dan keuletan struktur. Kode dan standar yang berbeda menggunakan aturan kombinasi modal yang berbeda, seperti akar kuadrat dari jumlah kuadrat (SRSS), kombinasi kuadrat lengkap (CQC), atau jumlah absolut (ABS).

Aturan kombinasi modal mempengaruhi besaran dan distribusi gaya gempa dan perpindahan pada struktur, serta kriteria desain dan faktor keselamatan. Beberapa kode dan standar juga memberikan aturan kombinasi modal yang berbeda untuk sistem struktur yang berbeda, seperti beraturan atau tidak beraturan, kaku atau fleksibel, atau elastis atau tidak elastis. Oleh karena itu, penting untuk memahami dan menerapkan aturan kombinasi modal yang sesuai untuk metode dan kode spektrum respons yang berbeda.

Pengaruh gempa bekerja biaksial dalam 2 arah sumbu X dan sumbu Z, dengan demikian kolom didisain untuk menahan beban lateral gempa agar tidak terjadi keruntuhan dalam 2 arah tersebut. Sehingga muncul istilah Strong Column Weak Beam, dimana kekuatan kolom menahan gaya lateral melebihi kemampuan balok dalam menahan beban gravitasi bila terjadi gempa. Kombinasi beban yang bekerja adalah:

- $\pm 30\%$  beban gempa arah X  $\pm 100\%$  beban gempa arah Z
- $\pm 100\%$  beban gempa arah X  $\pm 30\%$  beban gempa arah X



Gambar 6.2 Kombinasi gaya gempa untuk arah X dan Z

### 6.3. Prosedur Analisis Beban Gempa dengan Respons Spektrum

Pengaruh gempa bekerja biaksial dalam 2 arah sumbu X dan sumbu Z, dengan demikian kolom didisain untuk menahan beban lateral gempa agar tidak terjadi keruntuhan dalam 2 arah tersebut.

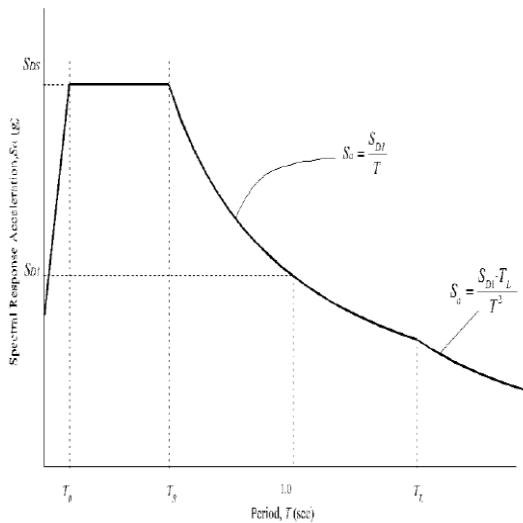
Sehingga muncul istilah strong column weak beam, dimana kekuatan kolom menahan gaya lateral melebihi kemampuan balok dalam menahan beban gravitasi bila terjadi gempa. Kombinasi beban yang bekerja adalah:

- $\pm 30\%$  beban gempa arah X  $\pm 100\%$  beban gempa arah Z
- $\pm 100\%$  beban gempa arah X  $\pm 30\%$  beban gempa arah X

Secara umum Langkah yang dapat digunakan dalam analisa respons spektrum adalah sebagai beriku.

1. Menghitung karakteristik masing-masing ragam :
  - Frekuensi (periode)
  - Bentuk ragam
  - Faktor partisipasi ragam
  - Massa ragam efektif

2. Menentukan jumlah ragam yang akan digunakan pada analisis.
3. Menggunakan jumlah ragam yang cukup agar mencapai minimal 100% massa total di masing-masing arah
4. Dengan menggunakan respons spectrum umum, dihitung percepatan spektral untuk masing-masing ragam yang berkontribusi.



Gambar 6.3 Respons Spektrum

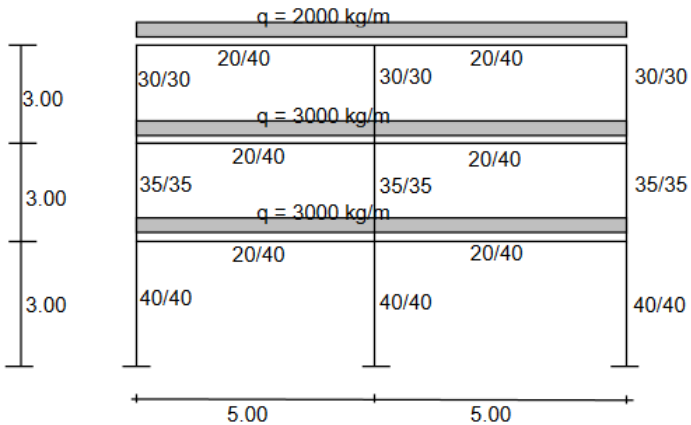
5. Mengalikan percepatan spektral dengan faktor partisipasi ragam dan dengan  $(I_e/R)$
6. Menghitung perpindahan untuk masing-masing ragam
7. Menghitung gaya elemen untuk masing-masing ragam

8. Mengkombinasikan perpindahan ragam secara statistik (SRSS atau CQC) untuk menentukan perpindahan sistem
9. Mengkombinasikan gaya-gaya komponen secara statistik (SRSS atau CQC) untuk menentukan gaya rencana
10. Untuk perhitungan drif, hasil analisis ragam perlu dikalikan dengan  $C_d/I_e$ .
11. Jika geser dasar desain dari analisis ragam (di masing-masing arah) kurang dari 85% geser dasar yang dihitung menggunakan ELF dengan batasan  $T = T_a C_u$  maka gaya elemen yang dihasilkan dari analisis ragam yang diskalakan sedemikian hingga geser dasar tersebut = 0.85 kali geser dasar ELF atau bila  $V_{cqc} < 85\% V_{static}$ , factor skala gaya dan simpangan antar lantai =  $0.85 V_{STATIK} / V_{CQC}$
12. Menambahkan torsi tak terduga. Untuk struktur beraturan yang terdiri atas lima tingkat atau kurang di atas tanah dasar dan dengan perioda  $T = 0,5$  detik atau kurang,  $C_s$  diperbolehkan untuk dihitung menggunakan nilai  $S_s = 1.5$

### **Contoh Kasus**

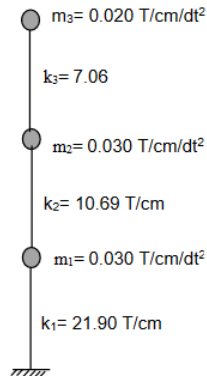
Contoh kasus ini diambil dari studi kasus artikel Studi Gaya Geser Gempa dengan Metode Respon Spektra, penulis Abrar Husen, Riana Herlina)

Diketahui sebuah gedung 3 lantai dengan komposisi sebagai berikut. Gedung berlokasi di Jakarta dengan kondisi tanah sedang.

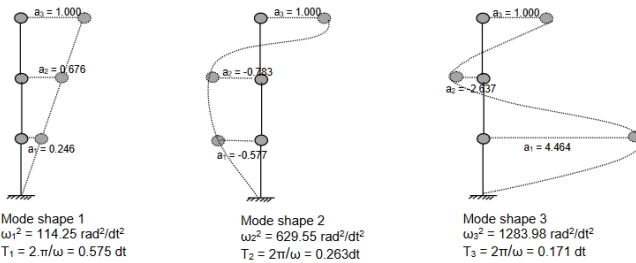


Hitunglah respons struktur tersebut dengan metode respons spektrum.

1. Menghitung Inersia dan kekakuan
2. Menghitung massa struktur, dengan mengabaikan berat balok dan kolom



3. Menentukan matriks kecepatan sudut
4. Menentukan mode shape



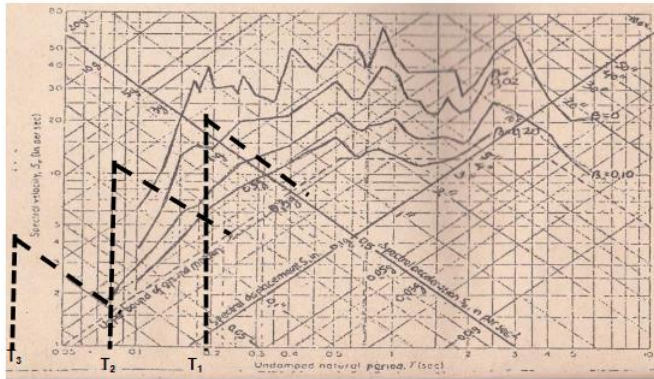
## 5. Menentukan Modal Participation Factor

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot a_{ij}}{\sum_{i=1}^n m_i \cdot a_{ij}^2}$$

Didapat hasil perhitungan dengan rumus di atas Modal Partisipation factor:

- Mode 1,  $S_1 = 1.342$
- Mode 2,  $S_2 = -0.421$
- Mode 3,  $S_3 = 0.086$

6. Menentukan Displacement/Perpindahan Horisontal Berdasar penggunaan respon spectra gempa Elcentro dengan maksimum percepatan gempa sebesar  $306 \text{ cm}/\text{dt}^2$ , serta lokasi bangunan pada lokasi Jakarta (spectrum disain dengan kondisi tanah sedang dan percepatan tanah dasar maksimum)  $S_{DS} = 2/3 \times 1.2 \times 0.75g$  maka  $0.6g = 0.6 \times 980 \text{ cm}/\text{dt}^2 = 558 \text{ cm}/\text{dt}^2$  serta fractional damping system  $\beta$  sebesar 10%, seperti ditunjukkan pada gambar berikut.



7. Menentukan Gaya Geser dan Koefisien Geser Gempa Tiap Tingkat

Menurut Standar Nasional Indonesia tentang Peraturan Gempa SNI 1726:2019 dengan Struktur Rangka Pemikul Momen Menengah (SPRMM) dengan:  $R=5$ , Kategori resiko IV,

$$I_e = 1.5$$

$C_s = S_{DS} / (R/I_e) = (558 / 980) / (5/1.5) = 0.167 \text{ cm/dt}^2$   
 Hasil dengan menggunakan plotting grafik respons spectra:

$$T_1 = 2. \pi / \omega_1 = 0.575 \text{ dt} \quad S_1 = 1.8'' \quad Z_1 = 167/306. (1.8'' \times 2.54) = 2.634 \text{ cm}$$

$$T_2 = 2. \pi / \omega_2 = 0.263 \text{ dt} \quad S_2 = 0.5'' \quad Z_2 = 167/306. (0.5'' \times 2.54) = 0.693 \text{ cm}$$

$$T_3 = 2. \pi / \omega_3 = 0.171 \text{ dt} \quad S_3 = 0.2'' \quad Z_3 = 167/306. (0.2'' \times 2.54) = 0.277 \text{ cm}$$

6.4. Displacement titik massa pada masing-masing mode

Rumus yang digunakan untuk lantai 3

$$x_{ij} = \sum a_{ij} \cdot z_i \cdot S_j, \text{ didapat: } x_{31} = 3.534, x_{32} = -0.291, x_{33} = 0.029$$

$i$  = menunjukkan tingkat bangunan

$j$  = menunjukkan mode shape  
 untuk lantai 2

$$x_{ij} = \sum a_{ij} \cdot z_j \cdot S_j, \text{ didapat } x_{21} = 2.338, x_{22} = 0.82, x_{23} = -0.083$$

Rumus yang digunakan untuk lantai 1

$$x_{ij} = \sum a_{ij} \cdot z_j \cdot S_j, \text{ didapat } x_{11} = 0.762, x_{12} = 0.187, x_{13} = -0.133$$

Menghitung displacement masing-masing titik massa  
 Tingkat 3

$$X_{32} = X_{312} + X_{322} + X_{332} = 12.57, X_3 = 3.54 \text{ cm}$$

Tingkat 2

$$X_{22} = X_{212} + X_{222} + X_{232} = 6.145, X_2 = 2.47 \text{ cm}$$

Tingkat 1

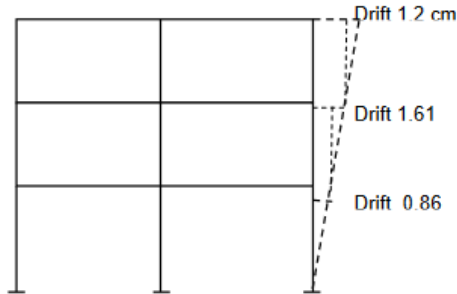
$$X_{12} = X_{112} + X_{122} + X_{132} = 0.63, X_1 = 0.86 \text{ cm}$$

Menghitung displacement relatif masing-masing tingkat (Drift)

$$\text{Tingkat 3: } X_{3rel} = X_3 - X_2 = 3.54 - 2.47 = 1.20 \text{ cm}$$

$$\text{Tingkat 2: } X_{2rel} = X_2 - X_1 = 2.47 - 0.86 = 1.61 \text{ cm}$$

$$\text{Tingkat 1: } X_{1rel} = X_1 = 0.86 \text{ cm}$$



Gaya geser tiap lantai.

Storey	W <sub>i</sub> (kg)	Σw <sub>i</sub> (kg)	k <sub>i</sub> (T/cm)	Drift (cm)	Gaya Geser (kg)	Shear Koef.
3	20000	20000	7.06	1.200	84.72	0.004
2	30000	50000	10.69	1.610	172.11	0.003
1	30000	80000	21.9	0.860	188.34	0.002
					445.17	kN

Chek Drift/simpangan antar lantai menurut SNI 1726:2012 tentang peraturan Gempa 2012, maks  $\Delta_{izin} = 0.02h = 0.02 \times 300 = 6 \text{ cm} > \Delta = 1.61 \text{ cm}$ , ok

### 6.5. Tugas dan Latihan

Analisislah kembali pembebanan gempa pada Bab 5 dengan metode respon spektrum. Tugas dilakukan secara berkelompok (3 orang) dan akan dipresentasikan di depan kelas.

## *Bab 7*

# *Analisis Beban Gempa Dengan Metode Analisis Riwayat Waktu*

### **7.1. Capaian pembelajaran**

**C**apaian pembelajaran yang diharapkan dapat dipenuhi mahasiswa peserta mata kuliah adalah kemampuan mahasiswa melakukan analisis pembebanan gempa pada struktur dengan metode Riwayat waktu atau time history. Mahasiswa memiliki pengetahuan tentang konsep dasar dan prosedur analisis time history.

### **7.2. Relevansi**

Keterkaitan antara isi dari bab ini dengan mata kuliah sebagai salah satu metode yang digunakan dalam analisa pembebanan seismik struktur. Metode time history ini adalah metode analisis yang lebih kompleks dari metode statik ekuivalen dan metode respons spektrum, sehingga seringkali memerlukan alat bantu seperti software komputer.

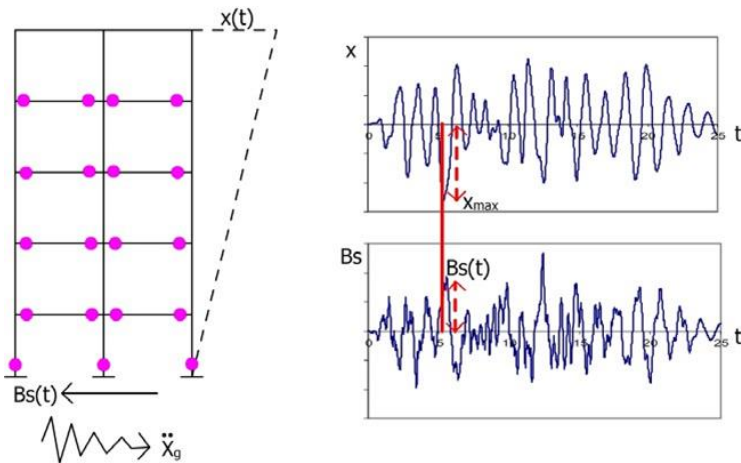
### **7.3. Pengantar umum**

Beban gempa yang mengenai struktur gedung merupakan beban dengan fungsi waktu, sehingga respon yang terjadi

pada struktur gedung juga merupakan fungsi dari waktu pembebanan. Beban gempa dalam bentuk riwayat waktu biasanya digunakan untuk kondisi nonlinear, meskipun juga bisa digunakan juga untuk kondisi linear. Kondisi nonlinear adalah dimana perilaku inelastic yang dicapai struktur setelah dikenai beban Gempa Rencana. Meskipun demikian, perilaku struktur juga bisa tetap dalam kondisi elastic setelah dikenai beban Gempa Rencana.

Beban gempa dalam fungsi riwayat waktu biasanya didapat dari rekam accelerogram yang merekam secara langsung gerakan dasar bumi saat terjadi gempa. Jika beban dalam bentuk fungsi waktu mengenai struktur gedung, maka penggunaan modal analisis tidak dapat dilakukan. Untuk itu biasanya dilakukan metode numerik seperti metode terhadap persamaan diferensial orde dua yang sudah menjadi persamaan coupled atau persamaan independen yang bisa dianalisis sebagai persamaan dengan satu derajat kebebasan (*Single Degree of Freedom, SDOF*). Metode integrasi yang sering digunakan seperti, Integral Duhamel, Metoda Newmark Beta dan sebagainya.

Analisis dinamik linier riwayat waktu (time history) sangat cocok digunakan untuk analisis struktur yang tidak beraturan terhadap pengaruh gempa rencana. Mengingat gerakan tanah akibat gempa di suatu lokasi sulit diperkirakan dengan tepat, maka sebagai input gempa dapat didekati dengan gerakan tanah yang disimulasikan. Dalam analisis ini digunakan hasil rekaman akselerogram gempa sebagai input data percepatan gerakan tanah akibat gempa. Rekaman gerakan tanah akibat gempa diambil dari akselerogram gempa El-Centro N-S yang direkam pada tanggal 15 Mei 1940. Dalam analisis ini redaman struktur yang harus diperhitungkan dapat dianggap 5% dari redaman kritisnya. Faktor skala yang digunakan =  $g \times I/R$  dengan  $g$  = percepatan gravitasi ( $g = 981 \text{ cm/det}^2$ ).



Gambar 7.1 Prinsip analisis dinamik (time history analysis)

Untuk melakukan analisis riwayat waktu, diperlukan pendekatan sistematis yang melibatkan beberapa langkah utama. Secara umum, langkah langkah tersebut adalah sebagai berikut:

1. Mendefinisikan Beban Dinamis:

Langkah pertama dalam analisis jenis ini adalah mengidentifikasi dan mengkarakterisasi beban dinamis yang akan ditanggung oleh struktur. Hal ini dapat mencakup catatan seismik atau data gempa yang diperkirakan mempengaruhi kinerja struktur.

2. Mengembangkan Model Matematika:

Selanjutnya, dilakukan pemodelan matematika dari struktur menggunakan perangkat lunak yang canggih. Model ini harus secara akurat mewakili sifat fisik dan perilaku struktur yang ditinjau.

### 3. Memilih Catatan Riwayat Waktu.

Analisis riwayat waktu bergantung pada rekaman data peristiwa dinamis aktual. Insinyur dengan hati-hati memilih catatan riwayat waktu yang sesuai dan sesuai dengan karakteristik kondisi pembebanan yang diharapkan. Catatan ini kemudian diterapkan pada model matematika.

### 4. Mensimulasikan Respon Struktur.

Setelah beban dinamis diterapkan, perangkat lunak melakukan simulasi numerik untuk memprediksi respons struktural dari waktu ke waktu. Ini melibatkan penyelesaian serangkaian persamaan diferensial yang mengatur gerak dan keseimbangan struktur.

### 5. Mengevaluasi Kinerja Struktur.

Hasil analisis memberikan wawasan berharga tentang bagaimana struktur berperilaku di bawah beban dinamis. Insinyur menilai berbagai parameter, termasuk perpindahan, percepatan, tegangan, dan gaya internal, untuk mengevaluasi kinerja struktural dan mengidentifikasi area yang menjadi perhatian.

### 6. Mengoptimalkan Desain.

Berdasarkan temuan analisis sejarah waktu, perencana dapat membuat keputusan yang tepat untuk mengoptimalkan desain dan meningkatkan respons struktural. Hal ini bisa melibatkan penyesuaian sifat material, modifikasi konfigurasi struktural, atau penerapan tindakan penguatan tambahan.

## 7.4. Keuntungan Analisis Riwayat Waktu

Metode analisis riwayat waktu menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan metode yang disederhanakan (*static equivalent method*). Berikut adalah beberapa manfaat

yang bisa diperoleh jika menggunakan analisis riwayat waktu adalah sebagai berikut:

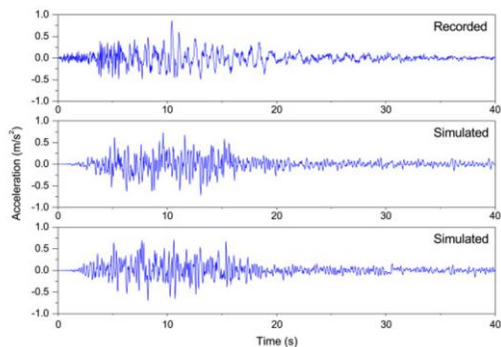
- Representasi lebih realistic terhadap perilaku struktur. Dengan mempertimbangkan sifat beban yang berubah terhadap waktu, analisis riwayat waktu memberikan representasi yang lebih akurat mengenai perilaku struktur sebenarnya. Hal ini memungkinkan para insinyur untuk lebih memahami respons dinamis dan mengidentifikasi potensi kerentanan.
- Evaluasi keamanan terhadap struktur dapat dilakukan. Peristiwa dinamis seperti gempa bumi dapat menimbulkan risiko signifikan terhadap keselamatan struktur. Riwayat waktu memungkinkan para insinyur menilai kinerja suatu struktur dalam kondisi pembebanan ekstrem, membantu mereka memastikan keamanan dan ketahanannya.
- Optimasi desain  
Sepanjang riwayat waktu, para insinyur dapat menyempurnakan desain struktur secara berulang untuk meningkatkan kinerjanya. Dengan mengevaluasi berbagai skenario dan mempertimbangkan respons dinamis, mereka dapat membuat keputusan yang tepat untuk mencapai solusi desain yang optimal.
- Kepatuhan terhadap kode dan standar  
Banyak kode dan standar bangunan memerlukan pertimbangan beban dinamis dalam proses desain. Analisis riwayat waktu memungkinkan para insinyur memenuhi persyaratan ini dan memastikan bahwa struktur mematuhi peraturan yang diperlukan.

#### **7.5. Penggunaan data gempa riwayat waktu dalam SNI 1726**

Jika data gempa dalam riwayat waktu akan digunakan untuk analisis respon struktur, maka dalam SNI Gempa 1726 disyaratkan paling sedikit tiga gerak tanah yang sesuai harus

digunakan dalam analisis. Data gerak tanah ini tergantung pada kondisi lokasi, geologi, topografi dan seismotektonik yang dipilih yang sesuai dengan lokasi tempat struktur gedung yang ditinjau berada. Hal ini untuk mengurangi ketidakpastian mengenai kondisi lokasi, sehingga paling sedikit harus ditinjau 3 buah akselerogram dari 3 gempa yang berbeda.

Jika rekaman gempa yang didapatkan tidak cukup, diperbolehkan menggunakan rekaman gempa buatan yang disesuaikan dengan respon spectrum di lokasi struktur berada. Rekam gempa yang digunakan juga harus dimodifikasi puncak percepatannya hingga sekurang-kurangnya setara terhadap spektrum SNI. Contoh rekam gempa asli dan rekam gempa yang telah dimodifikasi.



Hasil gambar untuk ACCELEROGRAM

Gambar 7.2 Data gempa yang tercatat accelelogram dan gempa hasil simulasi (modifikasi)

Jika data gempa dalam bentuk riwayat waktu sudah terdefinisi dengan benar, maka selanjutnya analisis terhadap struktur gedung dapat dilakukan dalam bentuk dua dimensi atau tiga dimensi.

Adapun ketentuan dari setiap analisis tersebut adalah sebagai berikut:

## 7.6. Analisis dua dimensi

Dalam analisis dua dimensi, percepatan tanah yang sesuai harus diambil dari rekaman peristiwa gempa yang memiliki magnitudo, jarak patahan, dan mekanisme sumber gempa. Apabila analisis dua dimensi dilakukan maka setiap gerak tanah harus terdiri dari riwayat waktu percepatan tanah horisontal yang diseleksi dari rekaman gempa actual tersebut.

Apabila jumlah rekaman gerak tanah yang sesuai tidak mencukupi maka harus digunakan rekaman gerak tanah buatan untuk menjadikan jumlah total rekaman gempa sesuai dengan yang dibutuhkan.

Rekaman gerakan-gerakan tanah tersebut harus diskalakan sedemikian rupa sehingga nilai rata-rata spektrum respons dengan redaman 5 % dari semua gerak tanah yang sesuai di situs tersebut tidak boleh kurang dari spektrum respons desain setempat untuk rentang perioda dari  $0.2T$  hingga  $1.5T$ , di mana  $T$  adalah perioda getar alami struktur dalam ragam getar fundamental untuk arah respons yang dianalisis.

## 7.7. Analisis tiga dimensi

Apabila analisis tiga dimensi dilakukan maka gerak tanah harus terdiri dari sepasang komponen percepatan tanah horisontal yang sesuai, yang harus diseleksi dan di skalakan dari rekaman peristiwa gempa individual.

Gerak tanah yang sesuai harus diseleksi dari peristiwa-peristiwa gempa yang memiliki magnitudo, jarak patahan, dan mekanisme sumber gempa yang konsisten dengan hal-hal yang mengontrol ketentuan gempa maksimum yang dipertimbangkan.

Apabila jumlah pasangan rekaman gerak tanah yang sesuai tidak mencukupi maka harus digunakan pasangan gerak

tanah buatan untuk menggenapi jumlah total yang dibutuhkan.

Untuk setiap pasang komponen gerak tanah horisontal, suatu spektrum SRSS harus dibuat dengan mengambil nilai SRSS dari spektrum respons dengan 5 persen faktor redaman untuk komponen-komponen gerak tanah yang telah diskalakan (di mana faktor skala yang sama harus digunakan untuk setiap komponen dari suatu pasangan gerak tanah).

Setiap pasang gerak-gerak tanah tersebut harus diskalakan sedemikian rupa sehingga pada rentang perioda dari  $0.2T$  sampai dengan  $1.5T$ , nilai rata-rata spektrum SRSS dari semua pasangan komponen horizontal tidak boleh kurang dari nilai ordinat terkait pada spektrum respons yang digunakan dalam desain.

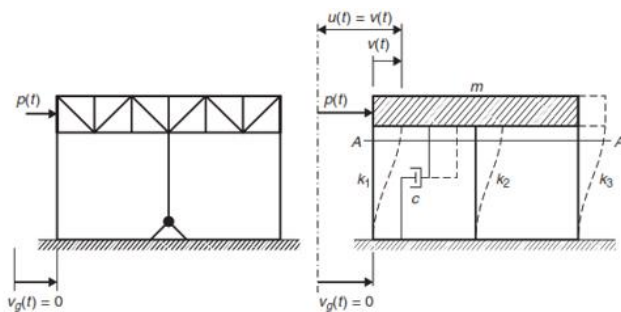
Untuk situs yang berada dalam jarak 5 km dari patahan aktif yang menjadi sumber bahaya gempa, setiap pasangan komponen gerak tanah harus dirotasikan ke arah normal-patahan dan arah sejajar-patahan sumber gempa dan harus diskalakan sedemikian rupa sehingga nilai rata-rata komponen normal patahan tidak kurang dari spektrum respons gempa MCER untuk rentang perioda dari  $0.2T$  hingga  $1.5T$ .

## **7.8. Penyelesaian persamaan dinamik analisis riwayat waktu**

Untuk menganalisis struktur yang dikenai beban dinamis, maka idealisasi struktur dapat digambarkan seperti Gambar 7.3a. Idealisasi pada gambar tersebut adalah:

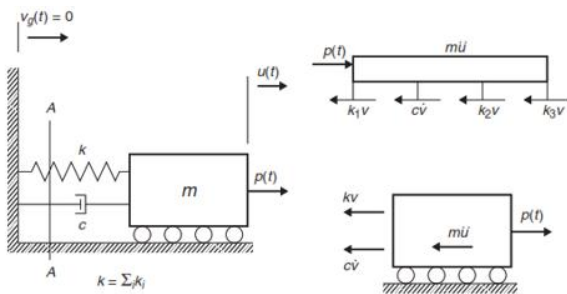
- a. Massa diasumsikan terkonsentrasi (digumpalkan) pada tingkat atap.
- b. Sistem atap diasumsikan kaku atau bisa disebut diafragmanya kaku.
- c. Deformasi aksial pada sistem kolom diabaikan.

Dari ketiga asumsi tersebut dapat disimpulkan bahwa semua lateral resistensi diberikan oleh elemen penahan seperti kolom, dinding, atau penyangga diagonal yang terletak di antara atap dan alasnya. Aplikasi dari asumsi-asumsi ini menghasilkan struktur diskritisasi yang dapat direpresentasikan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.3b atau Gambar 7.3c dengan gaya yang bergantung pada waktu diterapkan pada tingkat atap. Kekakuan total [K] hanyalah jumlah dari kekakuan setiap elemen penahan pada tingkat cerita. Gaya-gaya yang bekerja pada massa struktur ditunjukkan pada Gambar 7.3d.



a. Single story frame

b. Idealisasi system struktur



c. Ekuivalen spring massa damper sistem

d. Free body diagram section A-A

Gambar 7.3 Sistem SDOF akibat gerakan dasar permukaan (F.Naeim. *The Seismic Design Handbook*. 2<sup>nd</sup> ed.

Persamaan kesetimbangan yang dihasilkan adalah

$$f_i + f_d + f_s = p(t)$$

Dimana

$$f_i = \text{gaya inersia} = m\ddot{u}$$

$$f_d = \text{gaya redaman} = c\dot{u}$$

$p(t)$  = gaya dengan fungsi waktu

$\ddot{u}$  = percepatan total dari massa

$\dot{v}, v$  = kecepatan dan perpindahan relatif dari massa

Maka persamaan di atas dapat ditulis menjadi

$$m\ddot{u} + c\dot{v} + kv = p(t)$$

Perlu diperhatikan bahwa gaya pada elemen peredam dan elemen pengaku masing-masing bergantung pada kecepatan relatif dan perpindahan relatif pada ujung-ujung elemen tersebut, sedangkan gaya inersia bergantung pada percepatan massa total. Percepatan total massa dapat dinyatakan sebagai

$$\ddot{u}(t) = \ddot{v}_g(t) + \ddot{v}(t)$$

Dimana

$\ddot{v}(t)$  = percepatan massa relatif terhadap dasar bangunan

$\ddot{v}_g(t)$  = kecepatan dasar bangunan

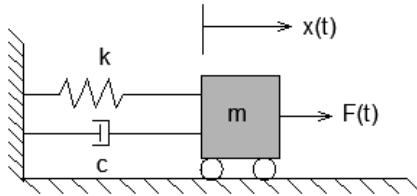
Jika persamaan tersebut disubstitusikan ke persamaan sebelumnya dengan memasukkan nilai  $p(t) = 0$ , maka

$$m\ddot{v} + c\dot{v} + kv = p_e(t) = -m\ddot{v}_g$$

Dimana  $p_e(t)$  adalah gaya dinamik efektif.

### 7.9. Integral Duhamel

Persamaan gerak yang merupakan persamaan diferensial biasa orde dua, dapat digambarkan dengan model osilator sederhana dengan redaman bersifat viscous (Gambar 6.1)



Gambar 7.4 Osilator sederhana dengan redaman viscous

Dengan model sederhana diatas, maka persamaan geraknya adalah

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$$

Untuk setiap fungsi gaya  $F(t)$  dari persamaan di atas dapat diselesaikan dengan menggunakan integral Duhamel berikut ini.

$$x(t) = \frac{1}{m\omega_D} \int_0^t F(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_D(t - \tau) d\tau$$

Dimana

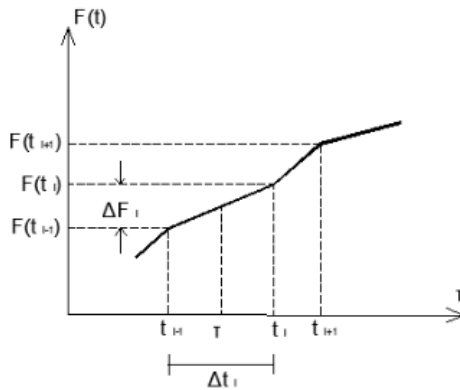
$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{adalah frekwensi sudut alamai}$$

$$\omega_D = \omega\sqrt{1 - \xi^2} \quad \text{adalah frekwensi sudut alami teredam}$$

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} \quad \text{adalah rasio redaman}$$

$c_{cr} = 2\sqrt{km} = 2m$  adalah konstanta redaman kritis

Persamaan tersebut menyatakan perpindahan total akibat pengaruh gaya  $F(t)$  yang bekerja pada osilator. Bila fungsi  $F(t)$  tak dapat dinyatakan secara analitis, maka integral pada persamaan di atas dapat dihitung dengan metode numerik berikut



Gambar 7.5 Persamaan fungsi beban linear umum

Perpindahan pada saat  $t_i$  adalah

$$x(t_i) = \frac{e^{-\xi\omega t_i}}{m\omega_D} \{ A_D(t_i) \sin \omega_D t_i - B_D(t_i) \cos \omega_D t_i \}$$

dengan

$$A_D(t_i) = A_D(t_{i-1}) + \left( F(t_{i-1}) - (t_{i-1}) \frac{\Delta F_i}{\Delta t_i} \right) I_1 + \frac{\Delta F_i}{\Delta t_i} I_4$$

$$B_D(t_i) = B_D(t_{i-1}) + \left( F(t_{i-1}) - (t_{i-1}) \frac{\Delta F_i}{\Delta t_i} \right) I_2 + \frac{\Delta F_i}{\Delta t_i} I_3$$

Dan

$$I_1 = \int_{t_{i-1}}^{t_i} e^{\xi\omega\tau} \cos \omega_D \tau d\tau = \frac{e^{\xi\omega\tau}}{(\xi\omega)^2 + \omega_D^2} (\xi\omega \cos \omega_D \tau + \omega_D \sin \omega_D \tau) \Big|_{t_{i-1}}^{t_i}$$

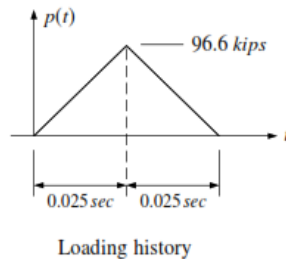
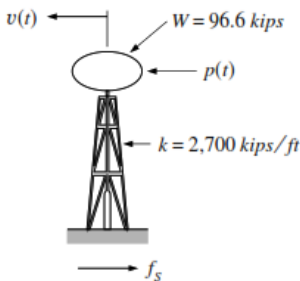
$$I_2 = \int_{t_{i-1}}^{t_i} e^{\xi\omega\tau} \sin \omega_D \tau d\tau = \frac{e^{\xi\omega\tau}}{(\xi\omega)^2 + \omega_D^2} (\xi\omega \sin \omega_D \tau + \omega_D \cos \omega_D \tau) \Big|_{t_{i-1}}^{t_i}$$

$$I_3 = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \tau e^{\xi\omega\tau} \sin \omega_D \tau d\tau = \left( \tau - \frac{e^{\xi\omega\tau}}{(\xi\omega)^2 + \omega_D^2} \right) I_2' + \frac{\omega_D}{(\xi\omega)^2 + \omega_D^2} I_1' \Big|_{t_{i-1}}^{t_i}$$

$$I_3 = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \tau e^{\xi\omega\tau} \sin \omega_D \tau d\tau = \left( \tau - \frac{e^{\xi\omega\tau}}{(\xi\omega)^2 + \omega_D^2} \right) I_1' + \frac{\omega_D}{(\xi\omega)^2 + \omega_D^2} I_2' \Big|_{t_{i-1}}^{t_i}$$

Secara numerik, solusi dari persamaan di atas adalah dengan menggunakan metode numerik untuk persamaan linier. Salah satu metode integral numerik yang sering digunakan adalah metode 1/3 Simpson atau metode 3/8 Simpson.

**Contoh Soal** (disadur dari Clough and Penzien, Dynamics of Structures)



Diketahui struktur menara air seperti tergambar. Struktur tersebut dikenai beban segitiga.

Frekwensi dan periode dari struktur tersebut adalah

$$\omega = \sqrt{\frac{kg}{W}} = \sqrt{\frac{2,700(32.2)}{96.6}} = 30 \text{ rad/sec} \quad \text{dan} \quad T = \frac{2\pi}{\omega} = 0.209 \text{ sec}$$

Jika lebar segmen dari satu kali iterasi adalah  $\Delta\tau = 0.005 \text{ sec}$ , dan pertambahan dalam perhitungan sudut  $\omega\Delta\tau = 0.15 \text{ rad}$ . Nilai damping ratio adalah 5 persen ( $\xi = 0.05$ ). Dengan menggunakan integral 1/3 Simpson, perhitungan dapat ditabelkan, dengan step perhitungan sebagai berikut:

- a. Kolom (4) sampai dengan (10) adalah langkah untuk menghitung  $\frac{A_N}{F}$  dimana

$$A_N = A_{N-2}2e^{-\xi\omega\Delta\tau} + \frac{\Delta\tau}{3m\omega_D} [2y_{N-2}e^{-\xi\omega\Delta\tau} + 4y_{N-1}e^{-\xi\omega\Delta\tau} + y_N] \quad \text{untuk } N = 1, 3, 5, \dots$$

$$\text{Dimana } y_N = P_N \cos \omega t_N$$

- b. Kolom (11) sampai kolom (17) adalah langkah untuk menghitung  $\frac{B_N}{F}$  dimana

$$A_N = A_{N-2}2e^{-\xi\omega\Delta\tau} + \frac{\Delta\tau}{3m\omega_D} [2y_{N-2}e^{-\xi\omega\Delta\tau} + 4y_{N-1}e^{-\xi\omega\Delta\tau} + y_N] \quad \text{untuk } N = 2, 4, 6, \dots$$

$$\text{Dimana } y_N = P_N \sin \omega t_N$$

- c. Kolom (18) sampai (21) adalah step untuk menghitung  $v_N$  dimana

$$v_N = A_N \sin \omega_D t_N - B_N \cos \omega_D t_N$$

- d. Kolom terakhir adalah gaya  $f_{sN} = kv_N$

- e. Untuk pase II adalah step untuk  $t_N \geq 0.050 \text{ sec}$ , dan seterusnya sampai dengan  $t_N = 0.090$ .

- f. Pada kolom (21) dan (22) terlihat bahwa maksimum respon pada  $t_N = 0.080$  dengan  $v_{max} = 0.024ft$  ( $0.732\text{ cm}$ ) dan  $f_{s,max} = 64.48\text{ kips}$  ( $29,390\text{ kg}$ )

TABLE E6-2  
Numerical Duhamel integral analysis including damping

N	$t_N$ sec	$p_N$ kips (1)	$\sin 30t_N$ (2)	$\cos 30t_N$ (3)	$F_N$ (4)	$F_{N-1}$ (5)	$F_{N-2}$ (6)	$M_{1,N}$ (7)	$M_{2,N}$ (8)	$\frac{dM_{1,N}}{dt}$ (9)	$\frac{dM_{2,N}}{dt}$ (10)	$F_N$ (11)	$F_{N-1}$ (12)	$M_{1,N}$ (13)	$M_{2,N}$ (14)	$\frac{dM_{1,N}}{dt}$ (15)	$\frac{dM_{2,N}}{dt}$ (16)	$\frac{dF_N}{dt}$ (17)	$\frac{dF_{N-1}}{dt}$ (18)	$\frac{dF_{N-2}}{dt}$ (19)	$v_N$ (20)	$f_{s,N}$ (21)	$f_{s,N}$ (22)	
0	0.000	0	0	1.000	0	—	—	—	—	—	—	0	0	—	—	—	—	0	0	0	0	0	0	
1	0.005	19.32	0.149	0.989	19.1	0	—	—	—	—	—	2.88	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
2	0.010	38.64	0.296	0.955	36.9	19.1	0	75.8	0	0	112.7	11.4	2.88	0	11.4	0	0	22.8	33.3	21.8	11.5	0.0002	0.58	
3	0.015	57.96	0.435	0.906	52.2	36.9	19.1	—	—	—	—	25.2	11.4	2.88	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
4	0.020	77.28	0.565	0.825	63.8	52.2	36.9	207.2	147.4	112.7	418.4	43.7	25.2	11.4	0.000	33.7	22.8	177.4	236	146	90	0.0017	4.50	
5	0.025	96.60	0.682	0.732	70.7	63.8	52.2	—	—	—	—	65.9	43.7	25.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
6	0.030	77.28	0.783	0.622	48.1	70.7	63.8	280.7	475.0	418.4	803.8	60.5	65.9	43.7	261.6	217.8	177.4	539.9	629	336	293	0.0054	14.65	
7	0.035	57.96	0.867	0.498	28.9	48.1	70.7	—	—	—	—	50.3	60.5	65.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
8	0.040	38.64	0.932	0.362	14.0	28.9	48.1	114.7	839.1	803.8	967.8	35.0	50.3	60.5	199.7	591.4	539.9	827.1	902	599	600	0.0112	30.2	
9	0.045	19.32	0.976	0.219	4.23	14.0	28.9	—	—	—	—	18.9	35.0	50.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
10	0.050	0	0.997	0.0707	0	4.23	14.0	16.8	967.1	967.8	983.9	0	18.9	35.0	75.0	850.1	827.1	925.1	981	65.4	915	0.0169	45.8	
11	0.055	0	0.997	-0.0791	0	0	0	—	—	—	—	0	0	18.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
12	0.060	0	0.974	-0.227	0	0	0	—	—	—	—	0	0	0	0	0	911.2	925.1	911.2	900	-206	1106	0.0203	55.4
13	0.065	0	0.929	-0.370	0	0	0	—	—	—	—	0	0	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—	
14	0.070	0	0.863	-0.565	0	0	0	0	954.6	969.1	0	0	0	0	0	897.5	911.2	897.5	824	-453	1277	0.0236	63.9	
15	0.075	0	0.778	-0.825	0	0	0	—	—	—	—	0	0	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—	
16	0.080	0	0.675	-1.075	0	0	0	0	940.3	954.6	940.3	0	0	0	884.0	897.5	884.0	635	-651.5	1286	0.0238	64.3		
17	0.085	0	0.558	-1.310	0	0	0	—	—	—	—	0	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
18	0.090	0	0.427	-1.594	0	0	0	0	926.2	940.3	926.2	0	0	0	870.7	884.0	870.7	395	-787	1182	0.0219	59.1		

$$\omega = \frac{30\pi}{1} \text{ rad/sec} \quad \Delta t = 0.005 \text{ sec} \quad M_1 = 4 \exp(-2\omega \Delta t) = 397 \quad M_2 = \exp(-2\omega \Delta t) = 0.985 \quad F = \frac{\Delta t}{2m} = 1852 \times 10^{-5} \text{ ft/kips} \quad k = 2700 \text{ kips/ft}$$

## 7.10. Nonlinear SDOF System

Persamaan (1) adalah persamaan differensial biasa yang dapat diselesaikan dengan persamaan Duhamel. Akan tetapi, jika sudah terjadi kondisi nonlinear pada struktur, maka persamaan diferensial orde dua menjadi

$m\ddot{x} + c\dot{x}(x, \dot{x}, t) = 0$  dengan kondisi batas adalah:

$$u(0) = u_0, \dot{u} = v_0$$

Seperti pada sistim dengan satu derajat kebebasan, persamaan gerak nonlinear ini dapat dikonversikan dalam bentuk orde satu, dengan mendefinisikan vektor:

$$x(t) \in R^{2 \times 1}$$

$$x(t) \equiv \begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{Bmatrix} \triangleq \begin{Bmatrix} u(t) \\ \dot{u}(t) \end{Bmatrix}$$

Persamaan gerak orde pertama memiliki bentuk:

$$\dot{x}(t) = (x(t), t)$$

Kemudian persamaan di atasnya menjadi:

$$\dot{x}(t) \equiv \begin{Bmatrix} x_2(t) \\ -\frac{1}{m}fx_1(t), t \end{Bmatrix}$$
$$x(0) \equiv \begin{Bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{Bmatrix}$$

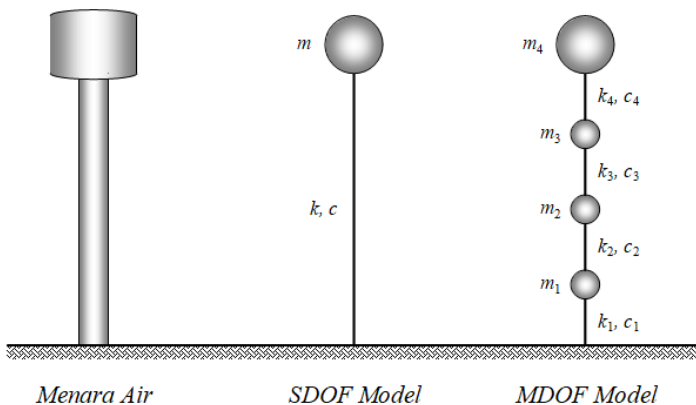
### 7.11. Nonlinear MDOF System

Analisis gempa pada struktur adalah topik yang kompleks dan memerlukan pemahaman yang baik tentang sifat-sifat material, teori struktur, dan metode numerik. Juga, penggunaan perangkat lunak simulasi struktur yang tepat sangat membantu dalam melaksanakan analisis ini.

Sistem struktur yang dimodelkan sebagai sistem dengan satu derajat kebebasan (*single degree of freedom system – SDOF*) hanyalah merupakan pendekatan dari struktur yang sebenarnya mempunyai derajat kebebasan yang tak berhingga jumlahnya. Keakuratan dari sistem *SDOF* tergantung pada karakteristik struktur dan beban luar yang dianalisa. Pemodelan struktur sebagai sistem *SDOF* akan memberikan nilai respon struktur yang akurat jika struktur dianggap hanya mempunyai satu bentuk perpindahan (lendutan) selama bergerak/bergerak. Jika struktur mempunyai lebih dari satu kemungkinan bentuk perpindahan, maka untuk mendapatkan respon dinamis struktur yang lebih baik dan lebih akurat, sebaiknya struktur dimodelkan sebagai sistem dengan banyak derajat kebebasan (*multi degrees of freedom system – MDOF*).

Apabila suatu struktur dengan banyak derajat kebebasan terkena gaya gempa maka akan timbul respon dinamik yang merupakan fungsi dari parameter-parameter dinamik yang dimilikinya. Sebagai contoh adalah sebuah struktur gedung tinggi yang mempunyai  $n$  derajat kebebasan, dengan  $n$  adalah jumlah lantai tingkatnya, maka struktur gedung

tersebut mempunyai  $n$  buah ragam,  $r$ , yang dinyatakan dengan vektor ragam  $[\varphi]_r$ . Setiap komponen dari vektor bentuk ragam menunjukkan perbandingan antara simpangan suatu lantai terhadap simpangan pada lantai tertentu yang ditetapkan sebagai acuan (biasanya lantai atap). Simpangan atap dianggap bernilai satu selama struktur tersebut bervibrasi bebas dalam suatu bentuk ragam vibrasi tertentu. Bentuk ragam vibrasi ini dapat dijelaskan dengan dalil Clough-Penzien yang menyatakan bahwa bentuk ragam vibrasi bebas adalah sedemikian rupa sehingga jumlah titik simpul (titik dengan simpangan nol) adalah sama dengan nomor ragamnya.



Gambar 7.6 Pemodelan Struktur menjadi SDOF dan MDOF

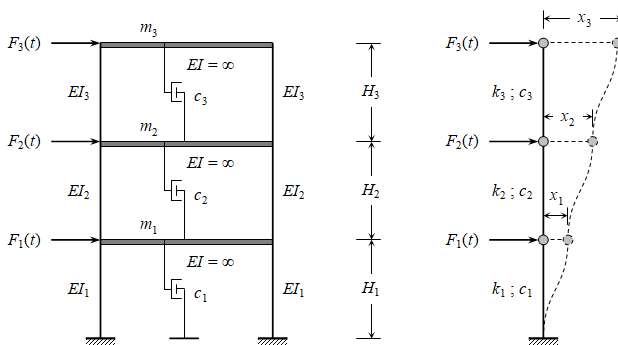
Salah satu bentuk struktur yang paling praktis digunakan dalam analisa dinamis struktur, yang dimodelkan sebagai sistem dengan banyak derajat perpindahan (*multi degrees of freedom sistem – MDOF*) adalah struktur bangunan geser (*shear building*). Bangunan geser (*shear building*) dapat didefinisikan sebagai struktur dimana tidak terjadi rotasi pada penampang horizontal bidang lantainya.

Ciri-ciri dari bangunan geser (*shear building*) adalah :

1. Massa total struktur dipusatkan pada bidang lantai dari masing-masing tingkat (*lumped mass*). Dengan mengasumsikan massa total struktur terpusat pada bidang lantai dari masing-masing tingkat, maka derajat kebebasan struktur yang tak berhingga jumlahnya (akibat massa yang terbagi rata pada struktur) dapat ditransformasikan menjadi beberapa derajat perpindahan sesuai dengan jumlah massa yang terkumpul pada bidang lantai
2. Kekakuan balok pada lantai dianggap tak berhingga dibandingkan dengan kekakuan kolom. Karena kekakuan balok dianggap teka berhingga atau balaok kaku sekali ( $EI = \infty$ ), maka pada balok tidak terjadi rotasi dan balok tetap lurus (balok tidak mengalami deformasi)
3. Pengaruh deformasi dari struktur akibat gaya aksial yang bekerja pada kolom diabaikan. Karena pengaruh deformasi aksial kolom diabaikan, maka balok pada lantai akan tetap horizontal selama bergerak

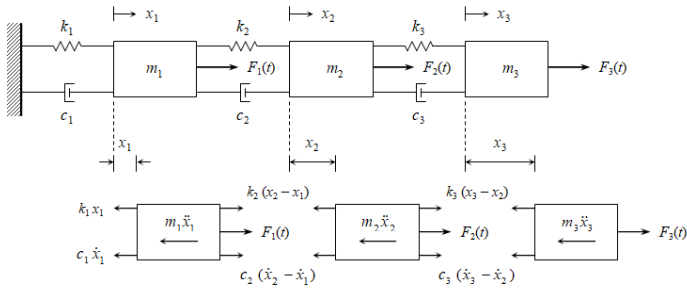
### 7.12. Formulasi Persamaan Gerak Bangunan Geser

Untuk menentukan persamaan gerak dari bangunan geser, tinjau suatu bangunan geser 3 lantai berikut :



Gambar 7.7 Bangunan geser 3 lantai

### a. Idealisasi



Gambar 7.8 Model Matematis dari Bangunan Geser 3 Lantai

### b. Idealisasi

Berdasarkan diagram *freebody* dari model matematis bangunan geser pada gambar di atas, diperoleh persamaan kesetimbangan dinamis struktur untuk masing-masing lantai sebagai berikut :

Persamaan kesetimbangan dinamis lantai 1 :

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2 (x_2 - x_1) = F_1(t)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 = F_1(t)$$

Persamaan kesetimbangan dinamis lantai 2 :

Persamaan kesetimbangan dinamis lantai 3 :

Secara umum, persamaan kesetimbangan dinamis masing-masing lantai pada bangunan geser, dapat ditulis dalam bentuk :

$$F_{li} + F_{Di} + F_{Si} - F_{Di+1} - F_{Si+1} = F_i(t)$$

dimana :

Dari persamaan kesetimbangan dinamis di atas diperoleh :

Persamaan di atas merupakan formulasi kekakuan (*stiffness*) dari persamaan gerak bangunan geser 3 (tiga) lantai. Secara

umum, persamaan gerak bangunan geser dapat ditulis dalam bentuk notasi matriks sebagai berikut :

dimana :

- $[M]$  = matriks massa (N-dt<sup>2</sup>/mm; lb-sec<sup>2</sup>/in)  
 $[C]$  = matriks redaman (N-dt/mm; lb-sec<sup>2</sup>/in)  
 $[K]$  = matriks kekakuan (N/mm ; lb/in)  
 $\{\ddot{x}\}$  = vektor percepatan (mm/dt<sup>2</sup> ; in/sec<sup>2</sup>)  
 $\{\dot{x}\}$  = vektor kecepatan (mm/dt; in/sec)  
 $\{x\}$  = vektor perpindahan (mm; in)  
 $\{F\}$  = vektor gaya luar (N; lb)  
 $n$  = jumlah derajat kebebasan (*degree of freedom*)

atau :

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & m_n \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & \cdots & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & \cdots & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & c_n \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & \cdots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \cdots & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & k_n \end{bmatrix}$$

$$\{\ddot{x}\} = \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \vdots \\ \ddot{x}_n \end{Bmatrix}$$

$$\{\dot{x}\} = \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{Bmatrix}$$

$$\{x\} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix}$$

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \\ \vdots \\ F_n(t) \end{Bmatrix}$$

Kondisi gerak bebas dari bangunan geser dapat dicapai jika bangunan geser sama sekali tidak dipengaruhi oleh gaya luar dan redaman pada bangunan geser diabaikan. Gerak yang terjadi pada bangunan geser hanya dipengaruhi oleh kondisi awal. Walaupun kondisi gerak bebas tanpa redaman pada bangunan geser jarang dijumpai, namun analisisnya sangat perlu dilakukan untuk mendapatkan sifat dinamis yang paling penting dari bangunan geser yaitu frekuensi natural dan pola perubahan bentuk (*mode shapes*).

Persamaan gerak struktur bangunan geser untuk kondisi gerak bebas tanpa redaman adalah sebagai berikut :

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\}$$

[M] adalah matriks massa, [K] adalah matriks kekakuan internal struktur, {x} adalah vektor simpangan struktur dan { $\ddot{x}$ } menunjukkan percepatan gerak dalam arah simpangan itu. Setelah mengalami penjabaran lebih lanjut, maka persamaan di atas menjadi suatu persamaan yang dalam matematika dikenal sebagai eigen problem.

Analisis gempa pada struktur menggunakan sistem Non-linier Multi Degree of Freedom (MDOF) melibatkan penggunaan persamaan gerak non-linier untuk menggambarkan respons struktur terhadap gaya gempa. Sistem Non-linier MDOF lebih realistis daripada sistem linier karena dapat mengakomodasi perubahan kekakuan dan redaman struktur sepanjang respons dinamisnya.

Berikut adalah langkah-langkah umum untuk menganalisis gempa pada struktur dengan menggunakan Sistem Non-linier MDOF:

1. Model Struktur:
  - Tentukan jumlah derajat kebebasan (DOF) untuk struktur. Derajat kebebasan ini mencakup perpindahan, kecepatan, atau percepatan di setiap titik kritis struktur.
  - Tetapkan sifat-sifat masing-masing elemen struktur, seperti kekakuan dan redaman.
  - Bentuk persamaan gerak struktur berdasarkan hukum kekekalan massa, hukum Hooke untuk kekakuan struktur, dan model redaman yang sesuai.
2. Persamaan Gerak Non-linier:
  - Gaya gempa yang bekerja pada struktur dapat diwakili sebagai fungsi waktu yang kompleks.
  - Bentuk persamaan gerak non-linier dengan memperhitungkan deformasi dan rotasi non-linier, serta sifat-sifat material yang dapat berubah sepanjang waktu.
3. Integrasi Numerik:
  - Karena solusi analitis mungkin tidak dapat ditemukan, metode numerik seperti metode Runge-Kutta atau metode Newmark digunakan untuk mengintegrasikan persamaan gerak sepanjang waktu.
  - Langkah waktu dan skema integrasi numerik yang dipilih harus memastikan kestabilan numerik dan akurasi hasil.
4. Analisis Non-linier Incremental:
  - Lakukan analisis secara incremental, di mana respons struktur dihitung dalam langkah-langkah waktu kecil.

- Evaluasi kondisi non-linier pada setiap langkah waktu, seperti perubahan kekakuan dan redaman karena deformasi yang berkembang.
5. Penilaian Keandalan dan Keamanan:
    - Evaluasi tingkat kerentanan struktur terhadap gempa dengan membandingkan respons struktur dengan batasan-batasan kinerja yang ditetapkan.
    - Identifikasi elemen-elemen struktur yang mungkin mengalami kerusakan atau kegagalan.
  6. Optimasi Desain:
    - Jika diperlukan, pertimbangkan untuk mengoptimalkan desain struktur untuk meningkatkan kinerja gempa dengan mengubah parameter kekakuan, redaman, atau struktur geometris.
  7. Verifikasi dan Validasi:
    - Verifikasi hasil analisis dengan hasil-hasil analisis lainnya atau dengan data uji lapangan jika tersedia.
    - Validasi model numerik dengan perbandingan hasil analisis numerik dengan data eksperimental jika mungkin.

Analisis dinamik merupakan metode analisis struktur dengan getaran gempa yang dimodelkan sebagai beban dinamik (beban yang arah dan besarnya berubah terhadap waktu). Analisis dinamik biasanya dilakukan menggunakan analisis ragam spectrum respons (response spectra) dan analisis riwayat waktu (time history). Pada analisis dengan menggunakan time history struktur yang di desain di berikan percepatan pada permukaan tanah sesuai dengan rekam percepatan terhadap waktu dari data time history.

### **7.13.Database Riwayat Gempa**

Sejak rekaman pertama percepatan tanah akibat gempa di peroleh di Long Beach, pada peristiwa gempa California pada tahun 1933, kini ribuan data percepatan tanah akibat gempa dari berbagai penjuru dunia telah direkam. Salah satu multi institusi yang bernama “The Pacific Earthquake Engineering Research (PEER)”, berpusat di University of California at Berkeley, mempunyai data lebih dari 10,000 rekaman strong ground motion yang terdiri dari 173 data gempa yang berbeda yang dapat diakses publik secara online. Lembaga Internasional lain yang juga mengeluarkan data gempa terbaru adalah US Geological Survey (USGS) dan National Earthquake Information Center (NEIC). Dan khusus untuk Indonesia catatan gempa Indonesia dikeluarkan oleh Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Data-data rekaman tersebut secara luas telah dipergunakan oleh engineers untuk berbagai keperluan seperti pada desain struktur bangunan tahan gempa.

Untuk mendapatkan hasil analisis dinamik yang akurat, maka pemilihan data time history ini harus sesuai dengan kondisi geologi, seismologi dan target parameter pergerakan batuan dasar (ground motion parameters), seperti percepatan gempa maksimum, kandungan frekuensi, dan durasi.

Pemakaian data time history yang diambil dari negara atau lokasi lain belum tentu sesuai diterapkan untuk semua lokasi atau kondisi di Indonesia. Untuk mendapatkan data time history bisa dilakukan dengan menggunakan data time history yang pernah direkam didekat lokasi studi, atau menggunakan data time history buatan (artificial time histories).

#### **7.14. Tugas dan Latihan**

Buatlah sebuah analisis untuk gedung 6 lantai (data silahkan dicari sendiri) dengan menggunakan analisis riwayat waktu, yang akan dipresentasikan dan didiskusikan di muka kelas. Lakukan secara berkelompok (3 orang).

## *Bab 8*

# *Analisis Non-Linier Bangunan Tahan Gempa (pengayaan)*

### **8.1. Capaian Pembelajaran**

Capaian pembelajaran yang diharapkan pada mahasiswa adalah memiliki pemahaman tentang analisis non-linier bangunan tahan gempa yang berguna sebagai pengantar untuk materi selanjutnya yang lebih kompleks. Dalam capaian pembelajaran ini tidak tercantum, karena bab ini hanyalah pengayaan.

### **8.2. Relevansi**

Keterkaitan antara bab ini dengan mata kuliah cukup besar mengingat analisis non-linier lebih mendekati hasil yang valid dari sebuah struktur. Materi pada bab ini memiliki keterkaitan langsung dengan bab 3, dan bab 4, 5, 6 dan 7.

### **8.3. Pengantar Umum**

Struktur tahan gempa pada umumnya direncanakan dengan mengaplikasikan konsep daktilitas, yaitu sebuah konsep di mana struktur dianggap tidak lagi perlu direncanakan untuk tetap dalam kondisi elastis saat memikul beban gempa terbesar yang diramalkan mungkin terjadi.

Secara praktis, analisis struktur terhadap gempa masih menggunakan metode force based design. Pada metode force based design perhitungan terhadap gaya gempa dilakukan

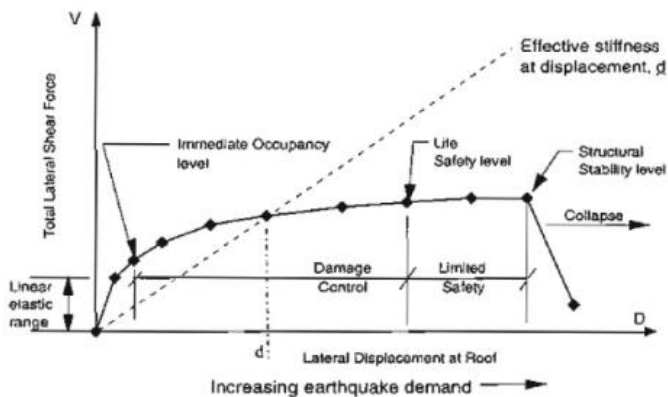
dengan analisa linear (elastis). Setelah gaya - gaya dalam diperoleh kemudian dilakukan desain untuk mendapatkan kapasitas dari tiap elemen struktur yang harus disediakan. Perhitungan kapasitas dari tiap elemen dapat dilakukan dengan persamaan - persamaan yang tersedia dalam beberapa standar perencanaan yang ada di Indonesia.

Beberapa peneliti menyimpulkan bahwa analisa linear tidak dapat digunakan untuk mengetahui perilaku struktur terhadap gempa besar. Hal ini karena pada dasarnya saat terjadi gempa besar pada struktur terjadi plastifikasi di berberapa tempat. Sehingga bangunan tidak lagi berperilaku linear akan tetapi berperilaku nonlinear. Dengan begitu diperlukan analisa nonlinear untuk mengetahui perilaku struktur saat mengalami gempa besar.

Merupakan suatu analisis struktur dimana gaya dan perpindahan yang terjadi pada struktur mempunyai hubungan non-linear. Biasanya non-linear analisis dibutuhkan saat tegangan berlebih atau perpindahan besar terjadi pada suatu struktur. Non-linear analysis bisa diklasifikasikan menjadi 3 kategori utama, yaitu:

- a. Material non-linear Analysis  
Ditemui saat pembebanan yang terjadi pada struktur relatif besar sehingga menghasilkan tegangan yang tinggi dalam hubungan tegangan-regangan non-linear.
- b. Geometry non-linear Analysis  
Digunakan saat suatu struktur mengalami perpindahan yang besar dan perubahan bentuk geometrisnya sehingga menghasilkan hubungan perpindahan-regangan non-linear.
- c. Boundary non-linear Analysis  
Ditemui saat hubungan beban-perpindahan terjadi pada struktur dimana kondisi batas berubah dengan deformasi struktural akibat beban eksternal.

Ada beberapa tingkatan kinerja sesuai ATC 40, dimana tingkatan kinerja digambarkan kurva hubungan antara perpindahan lateral dan besar gaya yang bekerja atau kurva kapasitas. Kurva kapasitas menggambarkan plot dari total gaya geser dasar akibat gempa, “V” pada struktur, untuk berbagai kenaikan pembebanan dan perpindahan lateral gedung pada atap pada tingkat gaya lateral tertentu (ATC 40, 1996).



Gambar 8.1 Kurva Kapasitas

Dari kurva kapasitas ini, akan dapat dilihat performance atau kinerja dari struktur berdasarkan standard yang digunakan. Biasanya kriteria yang dipakai adalah nilai daktilitas atau drift ratio yang kemudian diacukan kepada range nilai masing masing level.

Kurva kapasitas ini akan menjadi garis lurus dengan kemiringan yang sama jika berperilaku elastis linier dengan kekakuan struktur secara keseluruhan. Karena bangunan sebenarnya tidak memiliki kapasitas elastis linier di atas, maka kurva kapasitas biasanya terdiri dari serangkaian segmen garis lurus dengan penurunan kemiringan, yang merupakan degradasi progresif dalam kekakuan struktural

yang terjadi akibat bangunan mengalami perpindahan lateral, pelelehan dan kerusakan. Penurunan dari garis lurus ditarik garis dari asal plot ke point dalam kurva pada tingkat perpindahan lateral, “d” yang mewakili kekakuan sebagian atau kekakuan “efektif” pada struktur ketika dibebani secara lateral pada tingkat perpindahan tertentu. Pada Gambar di atas, simbol “♦” pada kurva kapasitas mewakili kejadian-kejadian penting selama respon lateral terhadap struktur. Kejadian-kejadian penting tersebut seperti pelelehan pertama pada salah satu elemen struktur atau kerusakan tertentu misalnya pecahnya atau terkelupasnya selimut beton pada kolom atau kegagalan geser pada spandrel hingga keruntuhan total pada system (ATC 40, 1996)[4].

<i>Tingkat Kinerja</i>	<i>Kondisi Bangunan Pasca Gempa</i>	<i>Kategori Bangunan</i>
SP-1 <i>Immediate Occupancy (IO)</i>	Bangunan aman saat terjadi gempa, resiko korban jiwa dan kegagalan struktur tidak terlalu berarti, gedung tidak mengalami kerusakan berarti, dan dapat segera difungsikan kembali.	Struktur bangunan yang mutlak difungsikan sebagai sarana penyelamatan, penyimpanan barang berbahaya, atau struktur bangunan yang dapat mempengaruhi ekonomi nasional. Contohnya Rumah sakit, Gudang bahan bakar/ bahan berbahaya dll.
SP-2 <i>Damage Control (DO)</i>	Merupakan transisi antara <i>Immediate Occupancy (IO)</i> SP-1 dan <i>Life Safety (LS)</i> SP-3. Bangunan masih mampu menahan gempa yang terjadi, resiko korban jiwa manusia sangat kecil.	Struktur untuk bangunan bersejarah, bangunan yang menjadi tempat penyimpanan barang-barang berharga.
SP-3 <i>Life Safety (LS)</i>	Bangunan mengalami kerusakan tetapi tidak diperkenankan mengalami keruntuhan yang menyebabkan korban jiwa manusia ( resiko korban jiwa sangat rendah. Setelah terjadi gempa maka bangunan dapat berfungsi kembali setelah dilakukan perbaikan komponen struktural maupun non-struktural.	Fasilitas-fasilitas umum, Gedung perkantoran, perumahan, gudang dll

Tujuan utama dari desain berbasis kinerja yaitu untuk menentukan tingkat kinerja yang diinginkan dari bangunan. kinerja seismik digambarkan dengan menetapkan tingkat

kerusakan maksimum yang diijinkan (performace level) untuk mengidentifikasi bahaya gempa.

Pada Gambar diatas telah diketahui kurva kapasitas suatu struktur terhadap beban lateral, dimana terdapat level-level kinerja tertentu. Level kinerja tersebut dapat dideskripsikan lagi atas bagaimana kondisi bangunan pasca gempa dan kategori bangunan yang diijinkan terhadap level kinerja tertentu, seperti pada tabel di atas.

Ada dua metode yang seringkali digunakan dalam analisis berbasis kinerja ini, yaitu:

- a. Analisis statis atau metode pushover, dan
- b. Analisis dinamis atau metode Non Linear Time History

#### **8.4. Pushover Analysis**

Analisa linear terhadap beban gempa, dapat dilakukan dengan metode statik ekivalen atau metode respon spektrum. Namun metode dengan pendekatan linear ini memiliki kekurangan walaupun analisisnya lebih mudah dari analisa dengan pendekatan nonlinear. Jika seseorang ingin melakukan analisis elastik linier suatu struktur di bawah beban gempa penuh dan menghitung gaya yang bekerja pada struktur, gaya resultan akan sangat besar, dan desain struktur tidak ekonomis dan tidak layak sama sekali. Oleh karena itu, perlu dibuat suatu pendekatan sehingga disain yang dihasilkan menjadi lebih layak dan lebih ekonomis. Pendekatan inilah sebenarnya yang menjadi dasar dari konsep analisa linear pada beban gempa, yaitu menentukan sebuah factor yang disebut dengan Response Reduction Factor.

Struktur yang terletak di daerah rawan gempa, akan didisain sedemikian rupa sehingga mampu menahan gaya dalam jumlah besar. Adanya R ini akan mempersiapkan kondisi

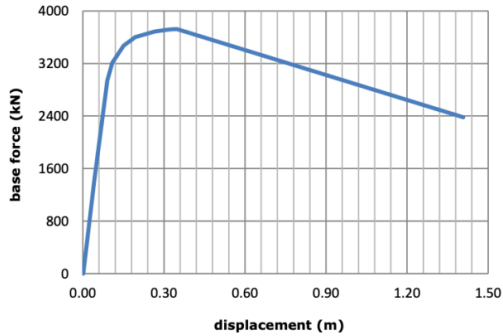
struktur sehingga mampu menerima distribusi gaya gempa dan menghasilkan bangunan yang mampu menahan gaya gempa tersebut. Ketika sebuah struktur didisain dengan, misalkan  $R = 5$ , itu artinya  $1/5$  dari beban seismic akan diambil oleh kapasitas layan. Sementara deformasi yang terjadi setelah itu berada pada perilaku daktail struktur dan akan ditanggung oleh kapasitas daktail dari struktur. Pada struktur beton bertulang, elemen struktur pada balok akan diberi penulangan sedemikian sehingga struktur mampu menahan pengaruh beban secara penuh tanpa mengalami kegagalan setelah melewati kapasitas layannya sampai kepada kapasitas daktail. Kelemahan dari konsep ini adalah bahwa perilaku setelah melewati kapasitas layan tidaklah sederhana, karena berbagai sebab. Misalnya terjadinya perubahan kekakuan pada elemen dan struktur, pengaruh  $P$ -delta, perubahan pada gaya gempa dan lain lain. Walaupun analisa elastis memberikan indikasi yang baik terkait kapasitas elastis pada struktur dan dapat menunjukkan saat terjadinya leleh pertama kali, tapi tetap tidak dapat diandalkan pada redistribusi gaya ketika terjadinya leleh yang dapat memprediksi mekanisme kegagalan struktur, atau mendeteksi kemungkinan dan lokasi dari kegagalan prematur. Analisa statik non-linier dapat memperkirakan hal hal tersebut dengan lebih rinci karena mempertimbangkan perilaku inelastik pada struktur. Metode ini mampu mengidentifikasi kemungkinan elemen mencapai tahap kritisnya selama terjadinya beban gempa.

Kebutuhan akan metode sederhana yang dapat memprediksi perilaku non linier dari struktur akibat beban gempa membuat munculnya sebuah metode yang bernama metode pushover. Metode ini menggunakan prosedur statis dengan teknik nonlinier yang disederhanakan untuk memperkirakan deformasi struktural seismik. Pushover analysis dapat menunjukkan bagaimana terjadinya proses mekanisme kegagalan struktur dan juga dapat

mengidentifikasi pola dari keruntuhan sebuah struktur. Dengan bahasa sederhana, pushover analysis adalah sebuah prosedur analisis nonlinier yang berguna untuk mengestimasi kapasitas kekuatan (strength capacity) dari sebuah struktur setelah melewati batas elastisnya sampai ke kekuatan ultimate. Dalam prosesnya, metode ini juga dapat memprediksi daerah-daerah yang lemah pada struktur, dari rekam jejak tahapan kerusakan dari masing-masing elemen struktur dengan munculnya sendi-sendi plastis.

Metode analisis pushover merupakan salah satu komponen performance based design yang dapat digunakan untuk mengetahui kapasitas suatu struktur. Dasar dari metode ini sangat sederhana, yaitu memberikan pola beban statik tertentu dalam arah lateral yang besarnya ditingkatkan secara incremental/bertahap sampai struktur tersebut mencapai target displacement tertentu atau mencapai pola keruntuhan tertentu. Meskipun metode ini sangat sederhana, namun informasi yang dihasilkan sangatlah berguna karena mampu menggambarkan respons in-elastis bangunan ketika mengalami gempa. Dengan kata lain, analisis ini memang bukan cara yang terbaik untuk mendapatkan jawaban terhadap masalah analisis dan desain, tetapi cara ini relatif mudah untuk mendapatkan respon nonlinier suatu struktur yang diketahui cukup rumit.

Hasil analisis pushover berupa kurva kapasitas (capacity curve) yaitu kurva hubungan antara displacement dengan base shear dan skema kelelahan berupa distribusi sendi plastis yang terjadi, disajikan dalam gambar di bawah ini:



Gambar 8.2 Kurva Kapasitas

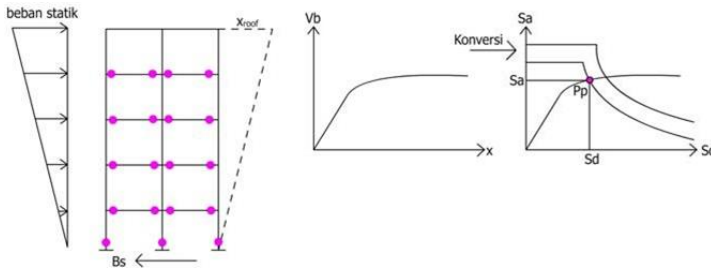
Pada analisis statik nonlinear beban gempa diasumsikan sebagai beban statik yang ditambahkan sedikit demi sedikit pada struktur sampai struktur daktail. Dari gaya geser dan perpindahan atap yang terjadi dapat dibuat kurva kapasitas, kemudian dilakukan analisis performance based design dengan mengkonversi kurva kapasitas menjadi spektrum kapasitas. Kemudian dicari titik performance point yang merupakan perpotongan antara spektrum kapasitas dengan demand spectrum. Setelah didapatkan titik performance point ( $S_a$ ,  $S_d$ ), maka bisa didapatkan perpindahan atap ( $x_{roof}$ ) dan gaya geser ( $V_b$ ) dengan persamaan berikut:

$$PF_1 = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{w_i \phi_i}{g}}{\sum_{i=1}^N \frac{w_i \phi_i^2}{g}}$$

$$\alpha_i = \frac{\left[ \sum_{i=1}^N \frac{w_i \phi_i}{g} \right]^2}{\left[ \sum_{i=1}^N \frac{w_i}{g} \right] \left[ \sum_{i=1}^N \frac{w_i \phi_i^2}{g} \right]}$$

$$\frac{S_a}{g} = \frac{V_b/w}{\alpha_i}$$

Dengan analisis ini diharapkan perpindahan atapnya mendekati perpindahan atap maksimum yang didapatkan dari analisis dinamik nonlinier.



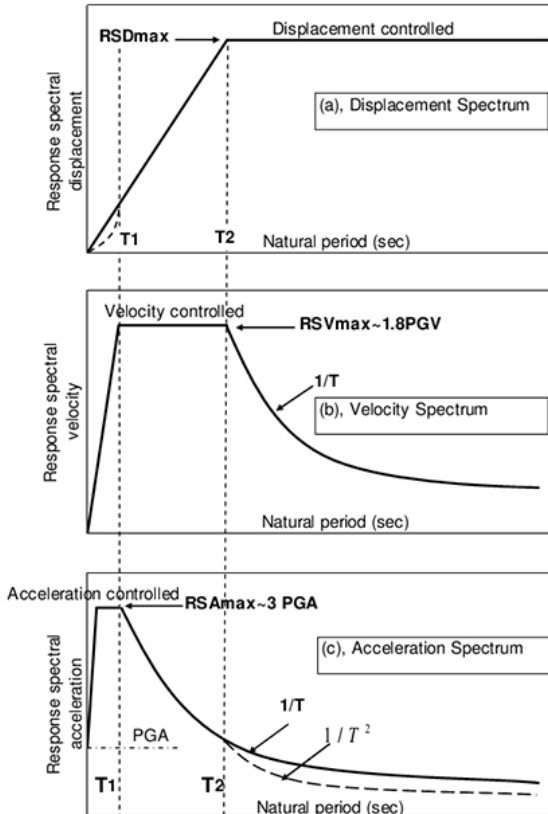
Gambar 8.3 Prinsip analisis statik nonlinier (pushover analysis)

### 8.5. Idealisasi dari Single Degree of Freedom

Salah satu dari penyederhanaan dasar pada konsep pushover analysis adalah anggapan bahwa struktur adalah sebagai struktur dengan kebebasan berderajat tunggal, yang dalam kondisi sebenarnya adalah sangat tidak mungkin. Itu artinya bahwa model struktur dengan begitu banyaknya titik kumpul massa akan dianggap sebagai sebuah batang yang memiliki perletakan jepit dan semua massa terkumpul di atasnya. Ini membuat struktur dengan banyaknya titik kumpul massa dengan nilai peredam (damping) yang berbeda beda (tergantung dari tingkat kerusakan yang dialami masing masingnya), akhirnya akan menjadi struktur tunggal yang memiliki satu nilai damping yang mewakili. Persamaan untuk ini telah dikembangkan dalam ATC-40 untuk mendapatkan nilai damping ratio ekuivalen ( $\beta$ ), dan juga periode alami struktur ( $T$ ) pada semua titik selama berlangsungnya analisis. Keduanya mengalami perubahan sebagai akibat dari pelemahan dari sendi plastis ketika berlangsungnya analisis. Pada akhirnya yang dihasilkan adalah deformasi pada puncak atap dan gaya geser dasar dari struktur.

## 8.6. Acceleration Displacement Response Spectra (ADRS)

Konsep inovatif lain dalam pushover analysis ini adalah Acceleration Displacement Response Spectra (ADRS), yang menggabungkan grafik gaya geser dasar ( $V_b$ ) terhadap perpindahan puncak atap ( $\Delta_{atap}$ ), dengan kurva respons spektrum.



Gambar 8.4 Contoh response spektrum (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan.

Ini dimungkinkan karena adanya hubungan antara  $V_b$ ,  $\Phi_{k,rooftop}$ , dan  $T$  (periode). Pertama, grafik hubungan  $V_b$  terhadap  $\Phi_{k,rooftop}$  harus ditransformasikan menjadi grafik spectral acceleration ( $S_a$ ) terhadap spectral displacement ( $S_d$ ) dengan menggunakan persamaan (ATC-40) berikut.

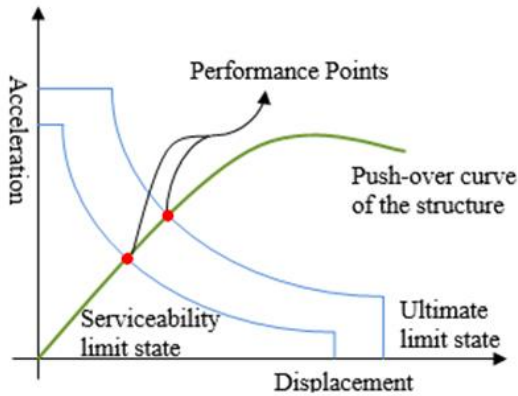
$$S_a = \frac{V_b/W}{(M_k/M)} \times g$$

$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{P_k \Phi_{k,rooftop}} \times g$$

Dimana  $M_k$ ,  $P_k$  dan  $\Phi_{k,rooftop}$  adalah modal massa, faktor partisipasi massa, amplitude modal pada puncak atap untuk mode pertama ( $k=1$ ).  $M$  dan  $W$  adalah total massa, berat dari struktur. Selanjutnya untuk grafik respons spektrum, sumbu  $S_a$  dan  $T$  harus dikonversikan dengan menggunakan hubungan berikut (ATC-40).

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} \times S_a$$

$T$  yang merupakan absis pada kurva respons spektrum, ditandai sebagai garis radial pada grafik hasil transformasi. Dengan menggunakan persamaan di atas, periode  $T$  yang disajikan dalam bentuk garis radial dari titik asal ke sembarang titik ( $S_d$ ,  $S_a$ ) dapat ditemukan. Kedua hasil transformasi ini yaitu grafik  $V_b$  terhadap  $\Phi_{k,rooftop}$  (kurva kapasitas) dan kurva respons spektrum, dapat digabungkan untuk mendapatkan plot Acceleration Displacement Response Spektra (ADRS) seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 8.5 Plot Acceleration Displacement Respons Spektra.

Dengan menerapkan beban perpindahan pada struktur dan melakukan analisa nonlinier pushover, maka kinerja struktur dan distribusi gaya yang lebih reliabel (valid) pada komponen struktur dapat dicapai walaupun dengan asumsi penyederhanaan kesamaan dari daktilitas dan kinerja, dan adanya kekakuan awal akibat perpindahan/beban dapat dihindari. Selain itu kelayakan struktur di bawah tingkat kinerja yang berbeda dapat dengan mudah dinilai.

Perencanaan struktur tahan gempa dengan berdasarkan pada perilaku kinerja struktur menghasilkan pendekatan yang lebih baik jika dibandingkan dengan metode disain berbasis gaya static yang biasa digunakan.

Kurva kapasitas dari struktur adalah kurva nonlinier yang dibagi dengan massa dinamis sebuah struktur. Perpotongan antara kurva kapasitas dengan ADRS menunjukkan apakah sebuah struktur memiliki cukup kapasitas untuk perpindahan dan kapasitas.

## 8.7. Non Linear Time History Analysis (NLTHA)

Analisis non-linear time history (NLTHA) adalah metode analisis dinamis yang digunakan dalam rekayasa struktural untuk mengevaluasi respons struktur terhadap beban gempa yang kompleks sepanjang waktu. Metode ini memberikan gambaran yang lebih realistis tentang perilaku dinamis struktur, terutama ketika struktur mengalami deformasi plastik atau non-linear.

Pada bagian sebelumnya juga telah disampaikan tentang analisis riwayat waktu atau time history analysis, namun pada bagian ini memiliki perbedaan dengan pembahasan sebelumnya. Istilah non linear menjadi pembeda yang sangat signifikan. Pada non linear time history analysis, kondisi ketidak-linieran struktur baik secara geometri maupun material ikut dipertimbangkan.

Secara umum analisis linier cukup jika strukturnya simetris dan sederhana. Analisis non-linier diperlukan untuk struktur yang kompleks atau tidak simetris. Mungkin juga diperlukan untuk struktur yang melibatkan kabel. Banyak bangunan saat ini memiliki konfigurasi yang tidak beraturan baik dari segi denah maupun ketinggian, sehingga analisis linier sudah dirasakan tidak cukup lagi. Bisa dikatakan bahwa untuk metode yang paling ampuh dan rasional untuk menilai respon dinamik suatu struktur yang terkena gempa adalah analisis NLTHA [5].

Penggunaan NLTHA dalam analisa dimaksudkan untuk mengevaluasi kinerja struktur setelah tulangan pada komponen balok dan kolom mengalami kelelahan. Peraturan yang digunakan mengacu pada tatacara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung (SNI 1726, 2019) dan pembebanan minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain (SNI 1727, 2020)

## 8.8. Incremental Dynamic Analysis

Seiring dengan pesatnya perkembangan teknologi komputer dan pemrograman, telah memungkinkan dilakukannya metode analisis yang semakin akurat, namun juga sekaligus semakin kompleks. Proses perjalanan dan perkembangan ilmu rekayasa struktur dan kegempaan, telah secara progresif bergerak dari analisis statis elastis, elastis dinamis, statis nonlinier dan akhirnya nonlinier.

Performance Based Earthquake Engineering (PBEE) merupakan suatu prosedur analisis yang memerlukan estimasi kapasitas seismic suatu struktur yang akan dibandingkan dengan kebutuhan seismic lokal. Perbandingan dari kedua komponen tersebut akan menghasilkan tujuan kinerja struktur yang diharapkan untuk intensitas seismic tertentu.

Dalam rangka untuk mengestimasi tujuan kinerja struktur dibawah beban seismic, maka dikembangkanlah metode analisis berbasis komputasi yang dinamakan "Incremental Dynamic Analysis (IDA)". Metode analisis ini mempunyai pendekatan yang mampu menghasilkan gambaran yang lebih detail terkait hubungan kapasitas seismic dan kebutuhan.

Incremental Dynamic Analysis (IDA) adalah metode analisis parametrik yang bertujuan untuk memperkirakan kinerja struktural yang lebih menyeluruh akibat beban seismic. Sebuah struktur dimodelkan dan mendapatkan satu (atau lebih) beban gempa dalam bentuk riwayat waktu, yang masing masingnya diskalakan ke beberapa tingkat intensitas, sehingga menghasilkan satu (atau lebih) kurva respons yang diparameterisasi versus tingkat intensitas.

Isu penting dalam rekayasa gempa berbasis kinerja adalah estimasi kinerja struktur akibat beban gempa. Secara khusus, kita tertarik untuk memperkirakan distribusi probabilistik

respon struktural dalam bentuk parameter permintaan teknik (Engineering Demand Parameter/EDPs) seperti pergeseran puncak antar lantai, percepatan lantai puncak, momen, atau geser, dengan mempertimbangkan tingkat intensitas seismik yang diwakili oleh (biasanya skalar) ukuran intensitas (IM). Analisis dinamis tambahan (IDA) telah dikembangkan untuk memberikan informasi tersebut dengan menggunakan analisis dinamis nonlinier dari model struktural di bawah serangkaian rekaman gerakan tanah, yang masing-masing diskalakan ke beberapa tingkat intensitas yang dirancang untuk memaksa struktur mulai dari elastisitas hingga ketidakstabilan dinamis.

Penggunaan skala gerakan tanah untuk menentukan respon suatu struktur pada peningkatan tingkat intensitas adalah teknik lama. Namun, hal ini belum digunakan secara sistematis untuk mengukur sifat probabilistik kerentanan struktur terhadap kerusakan seismik.

Meningkatnya perkembangan dan analisa komputer dari masa ke masa dapat meningkatkan akurasi hasil analisis dengan menggunakan metode yang lebih kompleks. Akibatnya, analisis bergeser dari statis linier ke dinamis linier, statis nonlinier, dan dinamis nonlinier. Untuk yang terakhir, analisis dinamik nonlinier, biasanya dirancang untuk mengendalikan struktur, analisis struktur dengan satu atau lebih catatan untuk mendapatkan satu atau lebih poin tunggal. Di sisi lain, di metode seperti metode Push-over (ATC, 1996) (SPO) atau spektrum kapasitas metode (ATC, 1996), Dengan penskalaan yang mewakili beban statis, kontinu gambaran perilaku struktur pada semua domain dari mode elastis hingga leleh mode dan akhirnya runtuhnya struktur, diberikan kepada kita. Saat kita melewati satu analisis statis, kita sampai pada analisis Pushover, demikian pula dengan berkembangnya analisis sejarah-waktu, kita hanya mencapai sedikit sejarah-waktu analisis yang

digunakan untuk menskalakan beban gempa. Pertama, konsep metode ini adalah diungkapkan oleh Bertero (1977) dan digunakan oleh beberapa peneliti kemudian.

Metode ini telah diterima dalam pedoman Federal Emergency Management Agency (FEMA) dengan nama The Incremental Dynamic Analysis (IDA) dan dapat digunakan sebagai metode untuk menentukan potensi keruntuhan seluruh struktur.

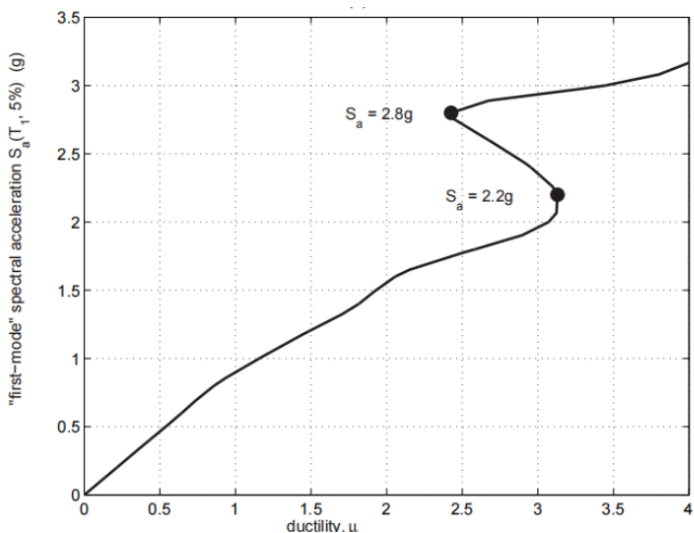
IDA sudah menjadi metode yang banyak digunakan dan serbaguna yang hanya memiliki beberapa tujuan yaitu:

1. Pemahaman penuh mengenai respon atau tuntutan struktur dalam berbagai macam berbagai tingkat catatan gerakan tanah.
2. Pemahaman yang lebih baik tentang efek struktural pada berbagai tingkat gerakan tanah dengan kekuatan yang lebih kecil atau lebih besar.
3. Pemahaman yang lebih baik mengenai perubahan sifat respons struktur dengan meningkatnya intensitas gerakan tanah (misalnya: perubahan ketinggian perpindahan maksimum, mulai berkurangnya kekerasan, kekuatan dan modelnya).
4. Evaluasi kapasitas dinamis seluruh sistem struktur.
5. Terakhir, mensurvei kurva IDA dengan banyak catatan dan bagaimana menjaganya tetap konstan.

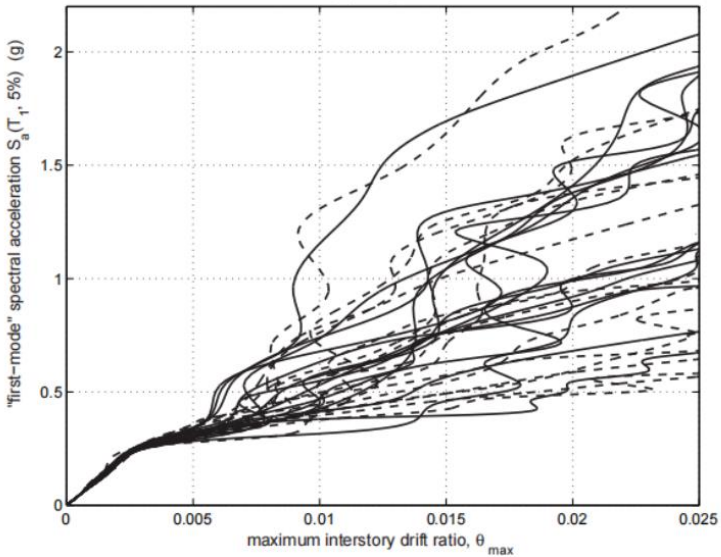
Pada Incremental Dynamic Analysis (IDA), model struktur akan diberikan satu atau lebih record ground motion yang masing-masing akan diskalakan sampai intensitas tertentu ((Patil, 2018; Rodríguez dkk, 2021)), sehingga dapat menghasilkan satu atau lebih kurva parameter respon – tingkat intensitas. Kurva IDA ini disajikan untuk Single Degree Of Freedom (SDOF) dan Multi Degree Of Freedom (MDOF). Dalam perkembangan Analysis struktur, perkembangan teknologi dan computer menjadikan analisis

ini menjadi semakin akurat walaupun juga semakin kompleks. Perkembangan ini dimulai dari elastic static analysis, mejadi dynamic analysis, kemudian menjadi non-linear static, dan akhirnya menjadi non-linear dynamic analysis [6].

Hasil dari IDA (Incremental Dynamic Analysis) biasanya di tampilkan dalam bentuk perbandingan antara DM (Damage Measure) dan IM (Intensity Measure). DM didefenisikan sebagai quantity scalar non- negative yang merupakan karakteristkik respon dari struktur terhadap beban seismik yang bisa diambil dari output hasil dari analisis dinamik non-linear. Karekteristik respon ini tergantung pada tujuan dari analisa struktur yang dilakukan, dapat berupa : Maximun base shear, maximum column ductility demand, maximum column drift ratio, dan global cumulative hysteretic energy [6].



Gambar 8.6 Single-IDA Curve



Gambar 8.7 Multi-IDA Curve

### 8.9. Tugas dan Latihan

Lakukan literature review (kajian Pustaka) tentang analisis struktur Gedung dan jembatan berdasarkan performance based design. Tugas dilakukan secara berkelompok dan akan dipresentasikan di depan kelas.

## Referensi

- B. Yön, E. Sayın, and O. Onat, "Earthquake and Structural Damages," in *Earthquakes - Tectonics, Hazard and Risk Mitigation*, no. Earthquakes, Intech, 2017, pp. 319–339.
- M. T. Chaudhary and A. Piracha, "Natural Disasters — Origins , Impacts , Management," pp. 1101–1131, 2021.
- M. Sherif, "The American Journal od Sociology," *Am. J. Sociol.*, vol. 72, no. 4, pp. 487–502, 1958.
- P. Fajfar, H.Krawinkler., *Nonlinear Seismic Analysis and*. 2005.
- J. L. Domingues Costa, R. Bento, V. Levitchitch, and M. P. Nielsen, "Simplified non-linear time-history analysis based on the theory of plasticity," *WIT Trans. Built Environ.*, vol. 81, pp. 375–385, 2005.
- H. Arshadi, "An Overview on The Concepts And Methodologies of Incremental Dynamic Analysis IDA (With A Single Record and Multiple Records)," *J. A Struct. Congr.*, vol. 3, pp. 168–176, 2016.
- B. A. Bradley, R. P. Dhakal, M. Cubrinovski, G. A. MacRae, and D. S. Lee, "Seismic loss estimation for efficient decision making," *Bull. New Zeal. Soc. Earthq. Eng.*, vol. 42, no. 2, pp. 96–110, 2009, doi: 10.5459/bnzsee.42.2.96-110.