



## **BAB II**

# **TINJAUAN PUSTAKA**

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Gempa**

Gempa bumi adalah fenomena alam yang disebabkan oleh pelepasan energi yang kuat di dalam kerak bumi. Ini bisa terjadi karena aktivitas tektonik, seperti pergeseran lempeng tektonik, atau karena aktivitas vulkanik, seperti letusan gunung berapi. Ketika tekanan yang terakumulasi di dalam kerak bumi melebihi batas tertentu, energi tersebut dilepaskan dalam bentuk gelombang seismik, yang menyebabkan getaran di permukaan bumi.

Gempa bumi dapat memiliki berbagai skala dan tingkat keparahan, tergantung pada sejumlah faktor, termasuk kedalaman, lokasi, dan kekuatan sumber gempa. Skala gempa biasanya diukur menggunakan skala Richter atau skala *Moment Magnitude* (*M<sub>w</sub>*), yang memberikan gambaran tentang energi yang dilepaskan oleh gempa tersebut.

Dampak dari gempa bumi bisa sangat merusak dan berbahaya. Getaran yang kuat dapat menyebabkan kerusakan pada bangunan dan infrastruktur, serta menimbulkan ancaman terhadap keselamatan manusia. Gempa bumi juga sering kali diikuti oleh efek sekunder seperti tanah longsor, tsunami (jika gempa terjadi di bawah laut), atau bahkan letusan vulkanik.

Untuk meminimalkan dampak gempa bumi, upaya mitigasi risiko sangat penting. Hal ini melibatkan pembangunan bangunan yang tahan gempa, perencanaan kota yang mempertimbangkan risiko gempa, sistem peringatan dini, dan pelatihan masyarakat tentang tindakan yang harus dilakukan saat terjadi gempa bumi. Meskipun gempa bumi tidak dapat dihindari sepenuhnya, langkah-langkah ini dapat membantu mengurangi kerusakan dan risiko terhadap nyawa manusia.

#### **2.2 Sistem Struktur Bangunan Tinggi**

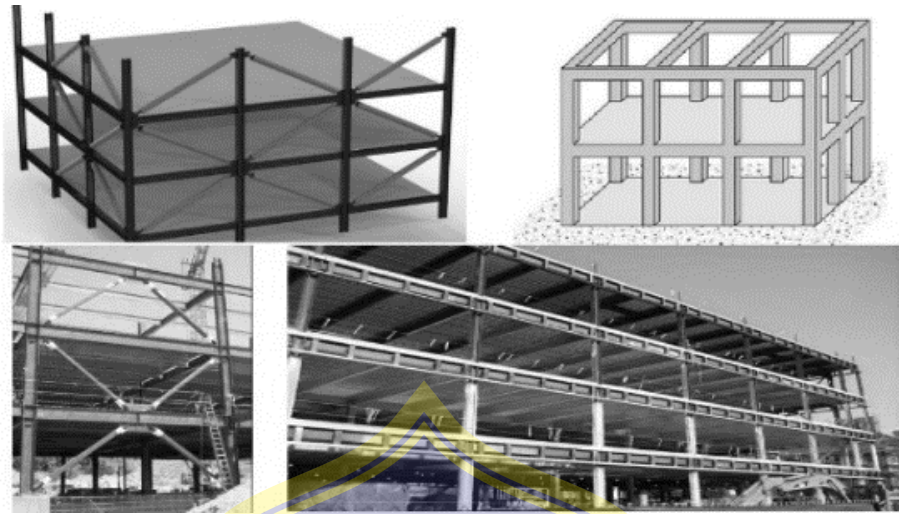
Sistem struktur bangunan tinggi adalah rancangan sistem struktural yang mendukung stabilitas, kekuatan, dan ketahanan bangunan terhadap berbagai beban, terutama beban angin dan gempa. Sistem-sistem ini mencakup beberapa jenis, seperti:

1. Struktur *Braced Frame*

Struktur *Braced Frame* seperti pada Gambar 2.1 banyak diaplikasikan pada konstruksi baja dan juga cocok untuk bangunan bertingkat yang berada di ketinggian rendah sampai menengah. Kelebihan struktur ini bisa diulang hingga ketinggian bangunan. Kekurangannya adalah bisa menghambat perencanaan internal dan mempengaruhi lokasi jendela dan pintu.

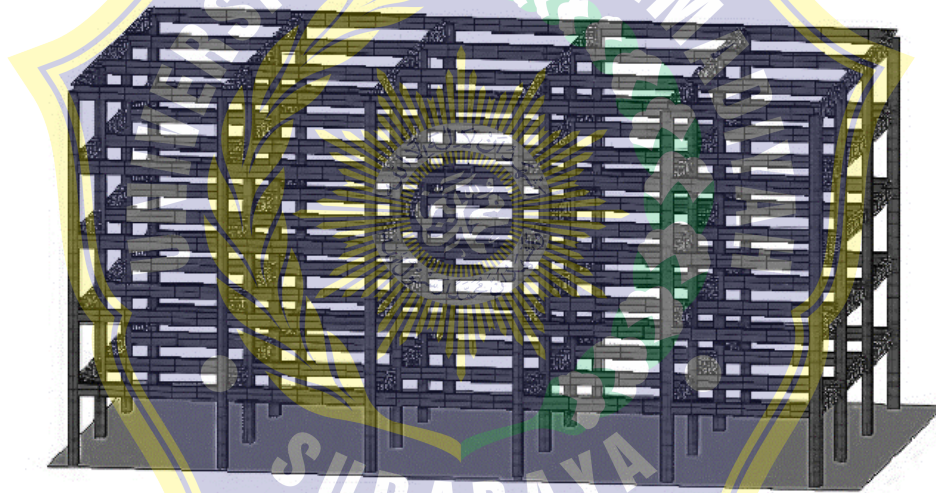
2. Struktur Rangka Kaku

Dalam tipe struktur ini, kolom dan balok dibuat secara monolitik untuk menahan beban. Sistem *Rigid Frame* atau rangka kaku seperti pada Gambar 2.2 sangat cocok untuk bangunan bertingkat dengan beton bertulang. Elemen struktur ini bisa menahan gaya geser, kelenturan, dan beban aksial.



Gambar 2.1 Struktur *braced frame*.

Sumber: Darkspecialist (2022)



Gambar 2.2 Struktur rangka kaku.

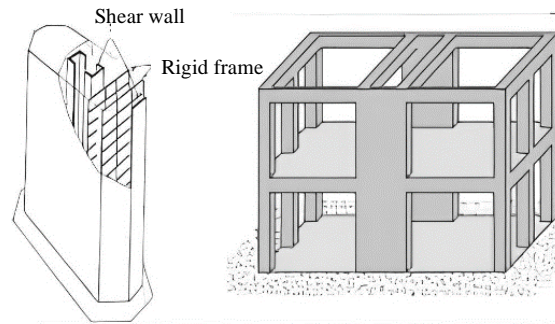
Sumber: MATEC web of converence 86 (2016)

3. Struktur *Wall Frame*

Struktur pada Gambar 2.3 terbentuk dari bingkai dan dinding yang berhubungan secara horizontal yang menciptakan struktur yang lebih kaku dan lebih kuat. Struktur ini bisa dijumpai di tangga, poros elevator, dan di sekeliling bangunan.

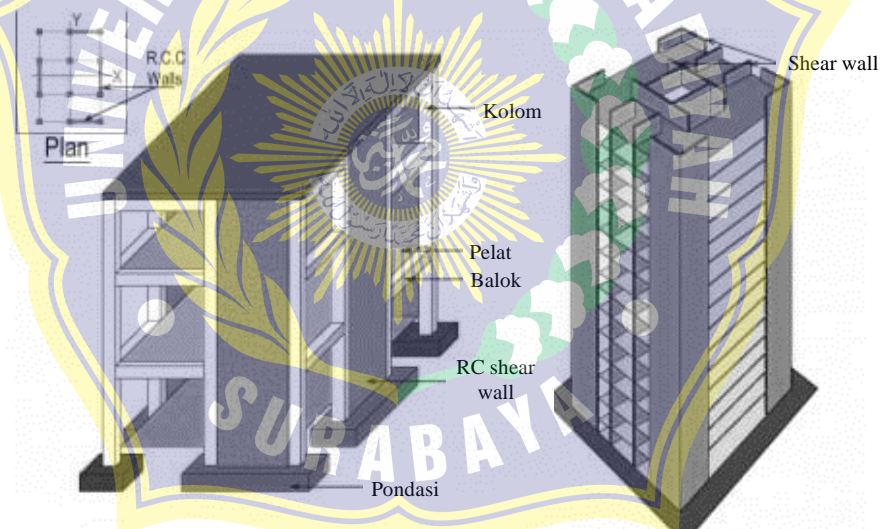
4. Struktur *Shear Wall*

*Shear wall* adalah elemen struktural berupa dinding beton bertulang yang dirancang untuk menahan gaya lateral seperti beban gempa dan angin. Struktur ini sangat cocok untuk menguatkan bangunan tinggi, baik struktur baja ataupun beton bertulang, karena struktur ini mempunyai kekuatan serta kekakuan bidang yang besar. Adapun contoh dari struktur *shear wall* dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.3 Struktur *wall frame*.

Sumber: Ruang sipil (2018)

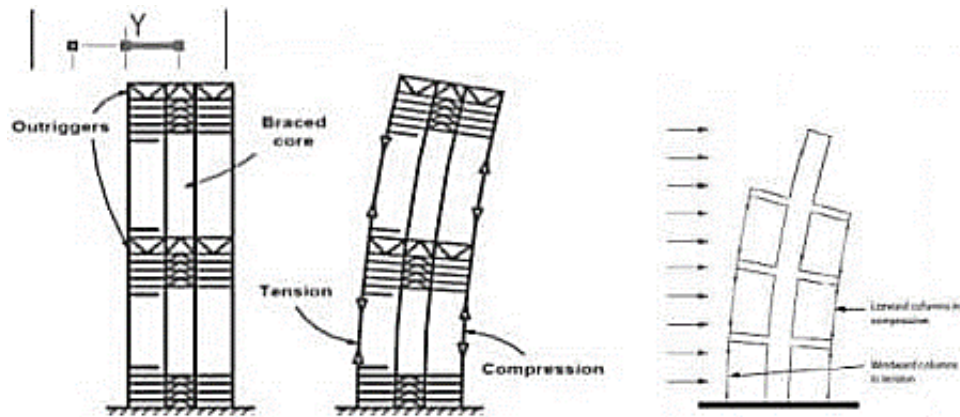


Gambar 2.4 Struktur *shear wall*.

Sumber: Ruang sipil (2018)

#### 5. Struktur *Core and Outrigger*

Struktur *Core and Outrigger* merupakan struktur horizontal kaku yang dibuat untuk menaikkan kekuatan serta kekakuan. Sistem struktur ini cocok diaplikasikan untuk bangunan yang memiliki hingga 70 lantai, dan juga bisa digunakan pada bangunan yang lebih tinggi lagi. Dengan adanya outriger, gaya lateral dapat ditransfer secara efektif dari core ke kolom perimeter sehingga meningkatkan stabilitas keseluruhan bangunan. Adapun contoh dari struktur *Core and Outrigger* dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Struktur *core and outrigger*.

Sumber: Ruang sipil (2018)

#### 6. Struktur *Infilled Frame*

*Infill frame* adalah sistem struktur yang terdiri dari rangka portal (balok–kolom) yang diisi dengan dinding pengisi (*infill*), biasanya berupa pasangan bata, batako, atau panel beton ringan. Meskipun awalnya sering dianggap sebagai elemen non-struktural, dinding *infill* sebenarnya ikut berperan dalam menahan beban lateral seperti gempa dan angin. Struktur rangka yang terisi dan terdiri dari kolom serta kerangka balok yang sebagian isinya diisi dengan beton bertulang, pasangan bata, maupun dinding balok. Struktur ini bisa digunakan untuk bangunan yang memiliki hingga 30 lantai. Adapun contoh dari struktur *infilled frame* dapat dilihat pada Gambar 2.6.

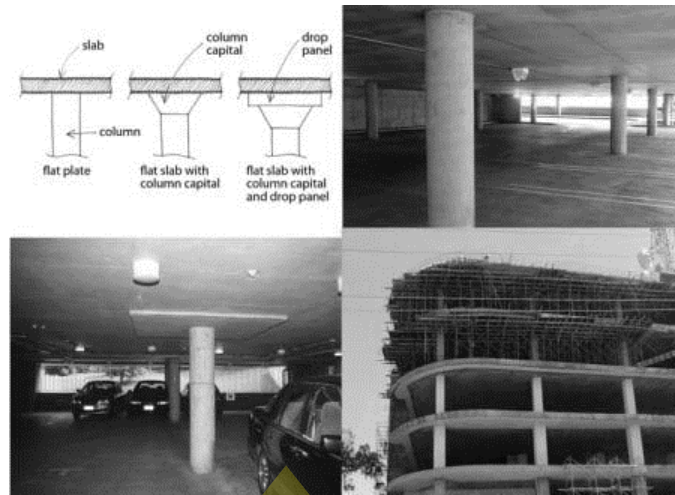


Gambar 2.6 Struktur *infilled frame*.

Sumber: Ruang sipil (2018)

#### 7. *Flat Plate*

*Flat Plate* adalah sistem lantai beton bertulang tanpa balok, di mana pelat (*slab*) langsung menumpu pada kolom. Struktur ini merupakan jenis pelat dua arah yang langsung terhubung ke kolom tanpa menggunakan balok, dan cocok digunakan untuk bangunan yang terdiri dari 25 lantai. Struktur ini bisa mengurangi waktu pengerjaan konstruksi dan ketinggian struktur. Adapun contoh dari struktur *flat plate* dapat dilihat pada Gambar 2.7.

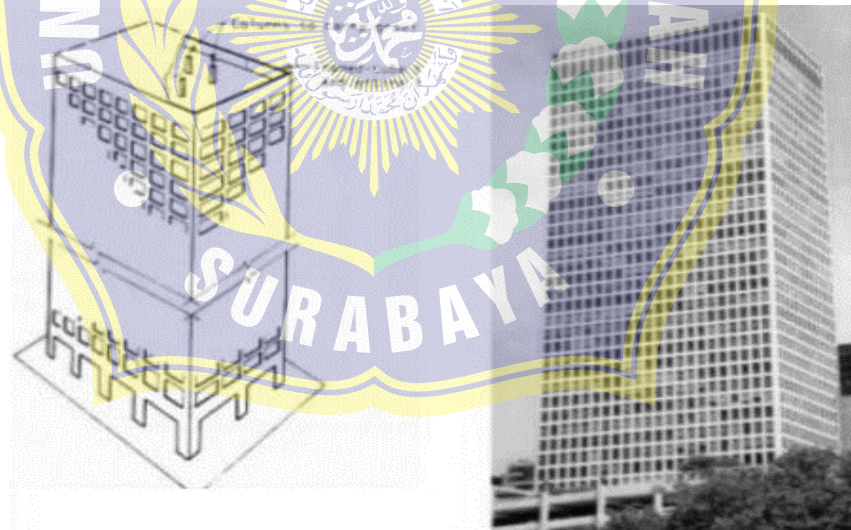


Gambar 2.7 Struktur *flat plate*.

Sumber: Ruang sipil (2018)

#### 8. Struktur Tabung

Struktur ini mencakup kolom eksterior dan balok yang menghasilkan bingkai kaku. Sedangkan, bagian interior struktur ini adalah kerangka sederhana yang dibuat untuk mendukung beban gravitasi. Struktur ini cocok diaplikasikan untuk bangunan yang memiliki hingga 60 lantai. Adapun contoh dari struktur struktur tabung dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Struktur tabung.

Sumber: Ruang sipil (2018)

### 2.3 Analisis Struktur Tahan Gempa

Analisis struktur tahan gempa pada penelitian kali ini digunakan *nonlinear dynamic analysis* berbasis *Nonlinear Time History Analysis (NLTHA)*. Metode analisis ini dapat digunakan pada semua jenis struktur bangunan tanpa tekecuali sesuai dengan SNI 1726-2019; Tabel 16; Hal-68. Adapun keunggulan dari metode ini diantaranya adalah sebagai berikut.

1. Metode *NLTHA* bisa memprediksi pola pembebanan (*loading pattern*) dan target *displacement* dengan akurasi tinggi.
2. Metode *NLTHA* dapat memprediksi perilaku struktur bangunan gedung dengan mode shape yang lebih tinggi (*hinger mode effect*).
3. Metode *NLTHA* bisa memperhitungkan pengaruh penurunan kekuatan akibat beban berulang (*cyclic degradation*) pada elemen struktur bangunan.

Pada analisis struktur menggunakan metode kegempaan *Nonlinear Time History Analysis (NLTHA)* terdapat parameter-parameter pendukung diantaranya analisis respon spektrum dan *earthquake ground motion*.

### 2.3.1 Analisis Respon Spektrum

Respon spektrum merupakan suatu spektrum yang disajikan dalam bentuk grafik/hubungan antara periode getar struktur  $T$  dari respon-respon maksimum berdasarkan rasio redaman dan gempa tertentu. Respon-respon maksimum dapat berupa simpangan maksimum (*spectral displacement/SD*), kecepatan maksimum (*spectral velocity/SV*) atau percepatan maksimum (*spectral acceleration/SA*), massa struktur *single degree of freedom (SDOF)*, (Widodo, 2001). Faktor respon gempa dinyatakan dalam bentuk percepatan gravitasi yang nilainya bergantung pada waktu getar alami struktur gedung dan kurvanya yang ditampilkan dalam respon spektra desain.

Dalam SNI 1726-2019 telah dijelaskan terkait faktor-faktor yang berkaitan dengan analisis respon spektrum, diantaranya sebagai berikut.

#### 2.3.1.1 Faktor keutamaan dan kategori risiko struktur bangunan

Faktor keutamaan dan kategori risiko pada bangunan ini telah diatur dalam SNI 1726-2019. Kategori risiko struktur bangunan gedung dan non gedung berdasarkan jenis pemanfaatan struktur bangunan dapat dilihat pada SNI 1726-2019; Tabel 3; Hal-24. Sedangkan pengaruh gempa rencana terhadap risiko struktur bangunan dikalikan dengan suatu faktor keutamaan  $I_e$  yang terdapat pada SNI 1726-2019; Tabel 4; Hal-25, dan koefisien modifikasi respons  $R$ , faktor kuat lebih sistem  $\Omega_0$ , dan koefisien defelksi  $C_d$  dapat dilihat pada SNI 1726-2019; Tabel 12; Hal-49.

#### 2.3.1.2 Parameter respon spektra percepatan gempa

Parameter  $S_{DS}$  untuk percepatan batuan dasar pada periode pendek dan  $S_{D1}$  percepatan batuan dasar pada periode 1 detik, didapat persamaan 2.1 dan 2.2. Respon spektrum yang digambarkan ke dalam grafik dapat dibuat dengan mengarah pada nilai parameter respon spektra yang telah dihitung ( $S_a, S_{DS}, S_{D1}, T_0$ , dan  $T_S$ ). Koefisien situs  $F_a$  dan  $F_v$  dapat dilihat pada Tabel 2.1 dan 2.2. Selain itu, parameter  $S_S$  dan  $S_1$  dapat dilihat pada Gambar 2.9 dan Gambar 2.10.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2.1)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (2.2)$$

Tabel 2.1 Koefisien situs,  $F_a$ .

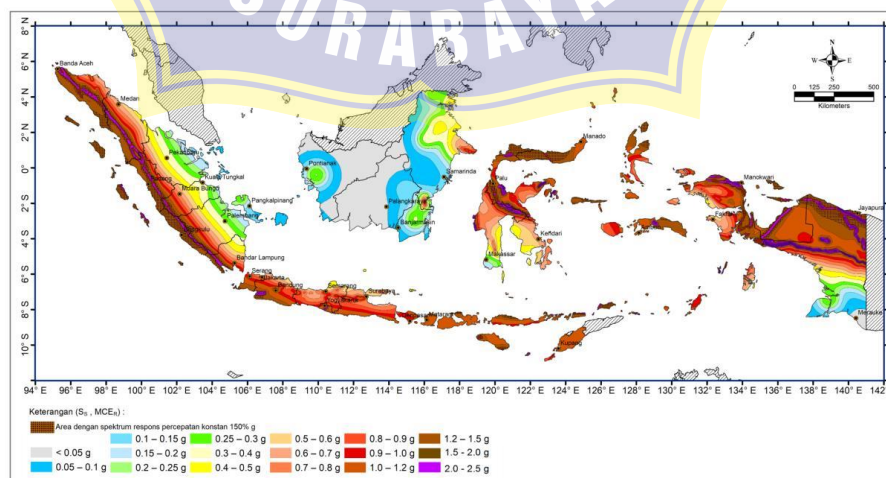
Kelas situs	Parameter respons spectral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCER) terpetakan pada periode pendek, $T = 0,2$ detik, $S_S$					
	$S_S \leq 0,25$	$S_S = 0,5$	$S_S = 0,75$	$S_S = 1,0$	$S_S = 1,25$	$S_S \geq 1,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	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	$S_S^{(a)}$					

Sumber: SNI 1726-2019 (Tabel 6)

Tabel 2.2 Koefisien situs,  $F_V$ .

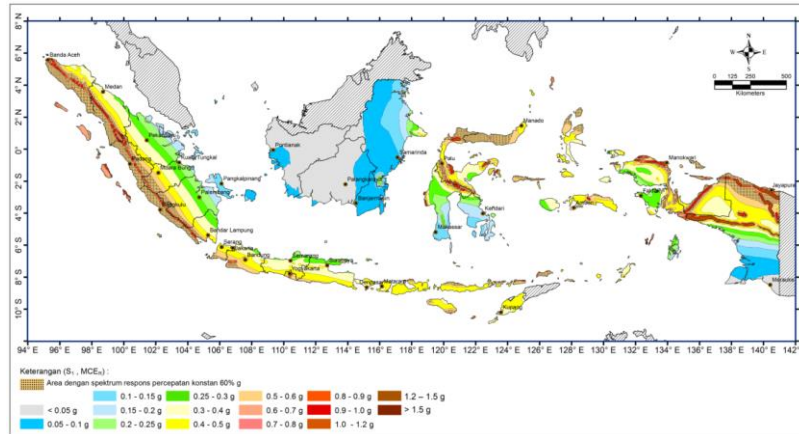
Kelas situs	Parameter respons spectral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCER) terpetakan pada periode pendek, $T = 1$ detik, $S_1$					
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 = 0,5$	$S_1 \geq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
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	$S_S^{(a)}$					

Sumber: SNI 1726-2019 (Tabel 6)



Gambar 2.9 Parameter gerak tanah  $S_S$ , wilayah Indonesia untuk spektrum respon 0,2 detik.

Sumber: SNI 1726-2019 (Gambar-15)



Gambar 2.10 Parameter gerak tanah  $S_1$ , wilayah Indonesia untuk spektrum respon 0,2 detik.  
Sumber: SNI 1726-2019 (Gambar-16)

### 2.3.1.3 Spektrum respons desain

Data tanah tidak diperlukan, jika desain respon spektrum telah menggunakan prosedur ini. Kurva desain respon spektrum yang terlihat pada Gambar 2.11 harus mengacu mengikuti ketentuan dibawah ini:

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

$$S_a = S_{DS} \left( 0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (2.3)$$

2. Untuk periode lebih besar dari atau sama dengan  $T_0$  dan lebih kecil dari atau sama dengan  $T_S$ , spektrum respon percepatan desain,  $S_a$ , sama dengan  $S_{DS}$ ;
3. Untuk periode lebih besar dari  $T_S$  tetapi lebih kecil dari atau sama dengan  $T_L$ , respon spektral percepatan desain,  $S_a$ , diambil berdasarkan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (2.4)$$

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

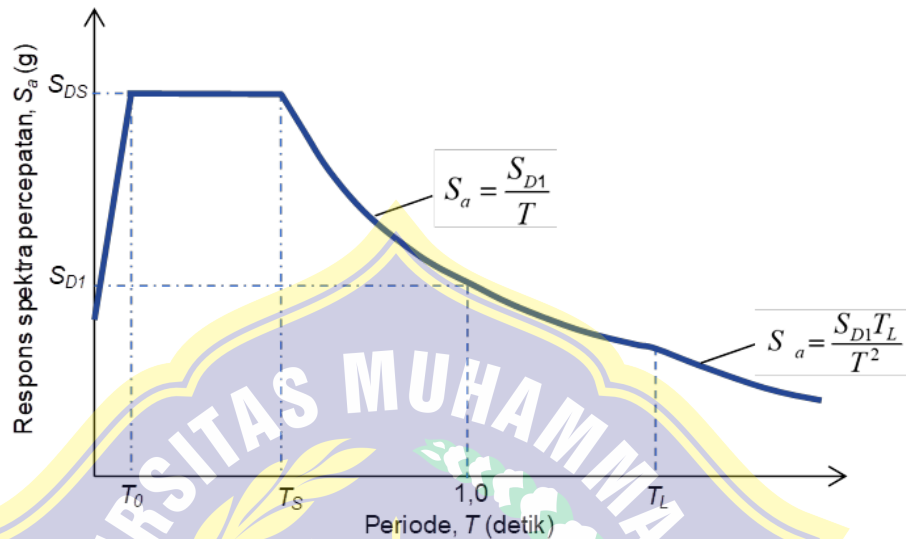
$$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \quad (2.5)$$

dimana:

- $S_{DS}$  = Parameter respon spektral percepatan desain pada periode pendek.
- $S_{D1}$  = Parameter respon spektral percepatan desain pada periode 1 detik.
- $T$  = Periode getar fundamental struktur.
- $T_L$  = Periode panjang.

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.6)$$

$$T_S = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.7)$$



Gambar 2.11 Spektrum respon desain.

Sumber: SNI 1726-2019 (Gambar-3)

### 2.3.2 Earthquake Ground Motion

*Earthquake ground motion* adalah pergerakan tanah akibat gelombang seismik yang timbul dari pelepasan energi secara tiba-tiba di kerak bumi saat gempa. Gerakan ini dapat berupa arah horizontal maupun vertikal dengan intensitas, frekuensi, dan durasi yang bervariasi tergantung magnitudo gempa, jarak ke sumber, dan kondisi geologi setempat. *Ground motion* umumnya disebabkan oleh pergeseran patahan atau tekanan mendadak, baik akibat peristiwa alam seperti gempa bumi dan letusan gunung api maupun aktivitas manusia seperti ledakan. Gelombang seismik terbagi menjadi body waves yang merambat melalui bagian dalam bumi dan *surface waves* yang merambat di permukaan, di mana gelombang permukaan biasanya paling merusak.

*Ground motion* diukur menggunakan seismometer, yaitu perangkat yang mendeteksi dan merekam gerakan permukaan bumi. Seismometer digunakan oleh seismolog untuk mempelajari gempa bumi dan jenis gerakan tanah lainnya. Rekaman yang dihasilkan oleh seismometer dikenal sebagai seismogram, dan dapat digunakan untuk mempelajari karakteristik gerakan tanah, seperti durasi, amplitudo, dan frekuensinya.

*Ground motion* biasanya diukur dalam tiga komponen: barat-ke-timur, selatan-ke-utara, dan vertikal. Rekaman dari beberapa seismometer dapat digabungkan untuk membentuk model gerakan tanah yang terperinci. Ini dikenal sebagai seismograf, dan dapat digunakan untuk mempelajari karakteristik spasial dan temporal gerakan tanah. Seismograf juga dapat

digunakan untuk membuat peta gerakan tanah, yang dapat membantu ilmuwan memahami distribusi dan intensitas gelombang seismik.

Data *ground motion* sendiri merupakan hasil rekaman gempa bumi yang dilakukan oleh alat seismometer. Secara umum data *ground motion* yang diperoleh dari seismometer berupa *ground acceleration*. Kemudian dengan mengintegrasikan *ground acceleration* maka diperoleh *velocity*. Hal yang sama juga bisa dilakukan dengan mengintegrasikan *ground velocity* sehingga diperoleh *ground displacement*.

*Ground motion (GM)* yang diperoleh umumnya berupa dua *ground motion* arah horizontal yang saling tegak lurus (H1 dan H2) dan satu *ground motion* arah vertikal (V). Dari dua *ground motion* arah horizontal tersebut bisa diperoleh parameter lainnya yang dikenal dengan istilah **RotD100, RotD50, RotD00**. Parameter tersebut merupakan hasil dari proyeksikan terhadap sumbu axis dengan sudut tertentu ( $\theta$ ). Adapun persamaan yang digunakan adalah:

$$\alpha_{ROT}(t; \theta) = \alpha_1(t) \cos(\theta) + \alpha_2(t) \sin(\theta) \quad (2.8)$$

dimana:

$\alpha_1$  &  $\alpha_2$  = Merupakan percepatan dari komponen horizontal.  
 $\theta$  = Sudut rotasi.

Dalam analisis struktur bangunan tahan gempa, umumnya *ground motion* yang digunakan adalah *ground motion* arah horizontal dengan asumsi arah-X dan arah-Y. Dengan kata lain, struktur bangunan diasumsikan menerima gempa dari dua arah yang saling tegak lurus dalam waktu bersamaan. Sedangkan *ground motion* arah vertikal hanya digunakan pada kasus tertentu, misalnya untuk struktur yang memikul *sensitive equipment*, struktur kantilever bentang panjang (*long span floor*), dan fasilitas industri yang memikul *massive equipment*, yang dimana struktur-struktur tersebut rawan rusak bila terjadi gempa arah vertikal.

Penentuan *ground motion (GM)* yang tepat merupakan salah satu parameter penting dalam proses analisis *NLTHA*. Dalam penentuan *GM* yang akan digunakan, terdapat dua parameter penting, diantaranya:

**a. Jumlah *ground motion*.**

Prinsip umum dalam menentukan jumlah *ground motion* dalam proses *NLTHA* adalah semakin banyak *ground motion* yang digunakan, maka akan diperoleh hasil yang semakin akurat. Bila mengacu pada *FEMA, ATC, NIST* dan *ASCE 7*, ada beberapa poin penting dalam menentukan jumlah *ground motion*, yaitu:

- Jumlah minimum *ground motion* yang digunakan adalah paling sedikit 7 *ground motion*. Dengan catatan, bila hasil *fitting* (proses *scaling* atau *matching*) terhadap *target response spectrum* sangat baik.
- Bila hasil *fitting* terhadap *target response spectrum* kurang baik (*poor quality*), maka disarankan untuk menggunakan 11 *ground motion*. Jumlah ini adalah yang paling umum digunakan dalam proses *NLTHA*. Dengan penggunaan 11 *ground motion*,

hasil yang dihasilkan dalam proses *NLTHA* adalah nilai rata-rata (*values of mean response*) dari perilaku struktur.

- Bila tujuan analisis *NLTHA* untuk mengetahui *probability of collapse*, maka harus digunakan paling sedikit 30 *ground motion*. Dengan penggunaan 30 *ground motion*, hasil yang dihasilkan dalam proses *NLTHA* adalah nilai *distribution of response* dari perilaku struktur.

Sedangkan bila mengacu pada *ASCE 7-16*, jumlah minimal *ground motion* yang digunakan adalah 11 *ground motion* dan tiap *ground motion* memiliki dua komponen pada arah-*X* dan arah-*Y*, sehingga total *ground motion* yang dianalisis adalah minimal 22 *ground motion*. Pada kasus tertentu, penggunaan *ground motion* bisa mencapai 30 *ground motion* sehingga total bisa mencapai 60 *ground motion*.

**b. Kriteria pemilihan *ground motion*.**

Kriteria yang akan digunakan sebagai *ground motion* dalam proses *NLTHA* terdapat pada *FEMA, NIST & ASCE/SEI 7-16*. Dalam hal ini, *ASCE 7-16* akan dijadikan sebagai rujukan utama terkait pembahasan kriteria pemilihan *ground motion* yang terdapat pada *Section C16.2.2; Page-659*. Adapun kriteria dari pemilihan *ground motion* sebagai berikut.

- *Source mechanism*: dalam pemilihan *ground motion* perlu mempertimbangkan kesamaan *source mechanism* data *ground motion* yang akan digunakan dengan lokasi yang ditinjau.
- *Magnitude*: Parameter ini akan sangat erat kaitannya dengan durasi *ground motion* yang akan digunakan karena dengan memilih besaran *magnitude* yang tepat maka secara tidak langsung telah memilih durasi *ground motion* yang tepat pula.
- *Site soil condition*: Kecocokan kondisi tanah asal *ground motion* dengan lokasi yang ditinjau menjadi parameter yang perlu dipertimbangkan, karena semakin tinggi kecocokan tanahnya, maka akurasi gempa yang dimodelka akan semakin baik.
- *Time step*: Parameter ini berkaitan dengan *time step* yang terdapat pada data *ground motion* yang digunakan. Semakin besar *time step* yang digunakan maka tingkat akurasi yang dihasilkan dari *ground motion* tersebut semakin kecil (*too coarse*), karena dikhawatirkan ada parameter penting yang terdapat dalam *ground motion* terlewatkan (*lost*).
- *Site-to-source distance*: merupakan parameter yang menjelaskan jarak lokasi yang ditinjau terhadap sumber gempa (*epicenter*).
- *Spectra shape*: Setiap *ground motion* memiliki *response spectrum* tersendiri. Maka dalam hal ini pilih *ground motion* yang memiliki bentuk *spectrum* yang mirip dengan *target response spectrum* yang digunakan.

Bila ditinjau dari tipe *performance assessment* yang akan digunakan sebagai syarat utama tiap tipe berbeda-beda, antara lain:

- *Intensity-based assessment*: Pada tipe ini, syarat utama yang dijadikan kriteria memilih *ground motion* adalah *spectral shape*.

- *Scenario-based assessment*: Pada tipe ini, syarat utama yang dijadikan kriteria pemilihan *ground motion* adalah *spectral shape*, *magnitude*, dan *site-to-source distance*.
- *Time-based assessment*: Untuk tipe ini, semua kriteria tersebut harus digunakan untuk memperoleh *seismic hazard curve* pada lokasi yang ditinjau.

Dari semua parameter yang telah disebutkan, parameter *spectral shape* merupakan parameter utama yang wajib dipenuhi dalam memilih *ground motion* yang berlaku untuk semua tipe *performance assessment*.

**c. *Period range for selection ground motion.***

*Period range* (rentang waktu) merupakan parameter yang erat hubungannya dengan *spectra shape* dalam *selection ground motion*. Rentang waktu tersebut merupakan tolak ukur dari kecocokan antara *response spectrum* (dari *ground motion*) terhadap *target response spectrum*. *Period range* yang dimaksud terdiri dari  $T_{min}$  &  $T_{max}$  yang dimana nilai tersebut diambil dari periode fundamental struktur ( $T_1$ ) pada *Mode shape-1* (pada arah  $x$  &  $y$ ). Adapun nilai  $T_{min}$  &  $T_{max}$  adalah sebagai berikut.

$$T_{max} \geq 2T_1 \quad (2.9)$$

$$T_{min} \geq 0,2T_1 \quad (2.10)$$

Sehingga periode range yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} T_{min} &\leq T \leq T_{max} \\ 0,2T_1 &\leq T \leq 2T_1 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Dikarenakan *response spectrum* yang diperoleh dari *ground motion (horizontal)* terdiri dari dua arah ( $x$  &  $y$ ), maka mencocokkan *response spectrum* tersebut terhadap *target response spectrum* menggunakan nilai *geometric mean (geomean)*. Penggunaan nilai *geomean* sesuai dengan *FEMA P58-Vol.1*. Adapun untuk memperoleh nilai *geomean* dapat melalui persamaan (2.12):

$$S_{gm}(T) = \sqrt{S_x(T) \times S_y(T)} \quad (2.12)$$

dimana:

$S_{gm}$  = Nilai *geomean* dari *response spectrum* suatu *GM*.

$S_x(T)$  = Nilai percepatan *response spectrum* arah-X.

$S_y(T)$  = Nilai percepatan *response spectrum* arah-Y.

Istilah “cocok” dalam proses ini dinilai dari terpenuhinya syarat SNI 1726-2019; Pasal 11.2.3.2; Hal-168, yaitu nilai *geomean* dari semua *ground motion* tidak boleh lebih kecil

dari 90% target *response spectrum* sesuai *period range* yang telah ditentukan sebelumnya.

### 2.3.3 Ground Motion Modification

Modifikasi ini dilakukan guna menyesuaikan intensitas gempa dari *ground motion* terhadap lokasi yang ditinjau. Hal yang perlu ditekankan disini adalah metode *ground motion modification* sama untuk semua tipe *performance assessment*, sehingga metode ini bisa digunakan untuk semua tipe *assessment*. Mengacu pada *FEMA*, *NIST*, *ASCE 7* dan khususnya *SNI 1726-2019*, metode *ground motion modification* dibagi menjadi dua macam yaitu ***Amplitude-scaled*** (*SNI 1726-2019*; Pasal 11.2.3.2) dan ***Spectral matching*** (*SNI 1726-2019*; Pasal 11.2.3.3). Adapun penjelasan lebih detailnya adalah sebagai berikut:

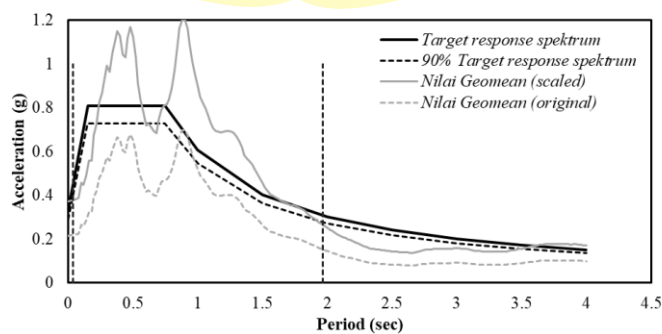
#### 2.3.3.1 Amplitude-scaled

*Amplitude-scaled* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk modifikasi *ground motion* dalam analisis *NLTHA*. Jenis metode ini hanya mengubah *amplitude* dari *response spectrum* dari *ground motion*. Dengan kata lain, bahwa *spectra* dan *ground motion* tidak berubah secara signifikan, seperti yang terlihat pada Gambar 2.12 dan Gambar 2.13.

Pada Gambar 2.13 terlihat bahwa terjadi peningkatan *amplitude* pada *response spectrum* yang telah diskala (*scaled*), dibandingkan dengan kondisi sebelum diskala (*unscaled*). Dan Gambar 2.13, nilai skala yang diperoleh dari Gambar 2.12 kemudian digunakan untuk memodifikasi *ground motion* sehingga terlihat jelas perbedaan antara *ground motion* yang asli (*unscaled*) dengan yang sudah diskala (*scaled*).

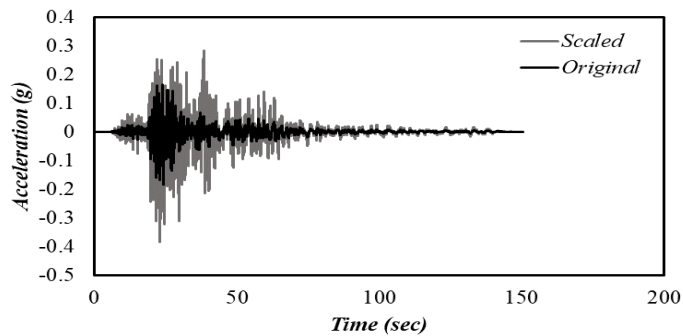
Perihal *amplitude scaled*, metode ini diatur dalam *SNI 1726-2019*, Pasal 11.2.3.2. Adapun poin – poin penting yang terdapat dalam *ASCE/SEI 7-16* dan *SNI 1726-2019* terkait metode *amplitude scaled* adalah sebagai berikut:

1. *Ground motion* horizontal yang digunakan terdiri dari dua komponen arah yang saling tegak lurus (arah *x* dan arah *y*).
2. Setiap *ground motion* akan menghasilkan *response spectrum* (arah *x* dan arah *y*).
3. Dalam proses *scalling*, *response spectrum* yang digunakan merupakan nilai *geomean* dengan menggunakan persamaan 2.12.



Gambar 2.12 Perbandingan *response spectrum* antara *scaled* dan *original* dengan metode *amplitude scaled*

Sumber: Lesmana (2020)



Gambar 2.13 Perbandingan *ground motion* antara *scaled* dan *original* dengan metode *amplitude scaled*.

Sumber: Lesmana (2020)

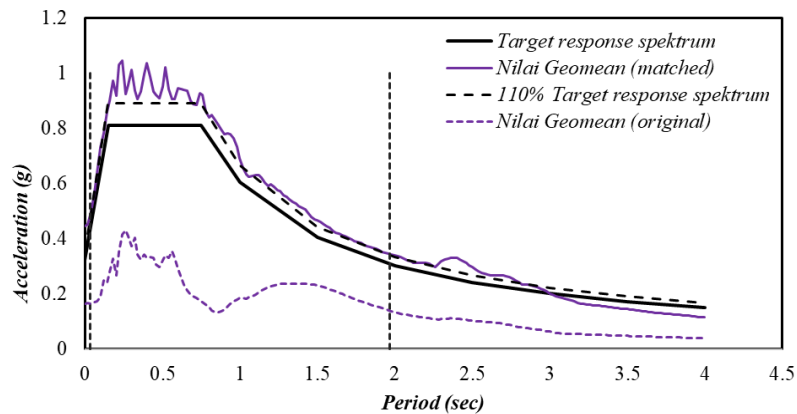
### 2.3.3.2 Spectral Matching

*Spectral matching* merupakan salah satu metode yang digunakan dalam proses *ground motion modification* dan memiliki perbedaan mendasar dibandingkan dengan metode *amplitude-scaled*. Metode *amplitude-scaled* hanya mengubah amplitudo *response spectrum* tanpa mengubah pola *ground motion*, sedangkan *spectral matching* memodifikasi pola dan bentuk keduanya. Dengan menggunakan *spectral matching*, baik *response spectrum* maupun *ground motion* mengalami perubahan yang signifikan dari segi amplitudo, bentuk, dan karakteristik spektral. Metode ini bertujuan agar *response spectrum* hasil modifikasi mendekati spektrum target yang disyaratkan oleh peraturan. Selain itu, kesesuaian spektrum yang lebih baik diharapkan menghasilkan respons struktur yang lebih representatif terhadap kondisi seismik lokasi. Ilustrasi perubahan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.14 dan Gambar 2.15.

Perihal *spectra matching*, metode ini diatur dalam SNI 1726-2019, Pasal 11.2.3.3. adapun poin – poin penting yang terdapat dalam ASCE/SEI 7-16 dan SNI 1726-2019 terkait metode *spectra matching* adalah sebagai berikut:

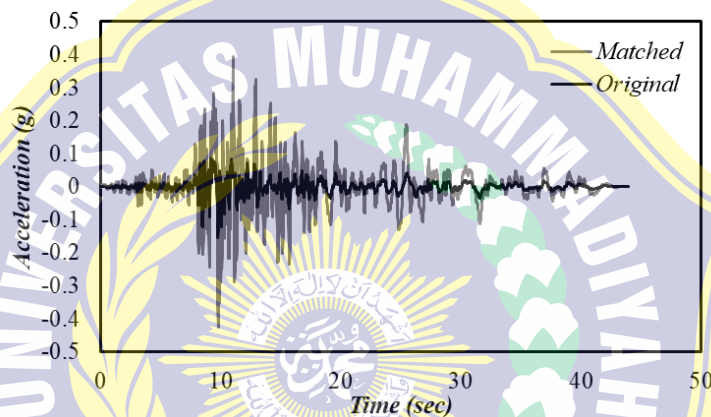
- *Ground motion* horizontal yang digunakan terdiri dari dua komponen arah yang saling tegak lurus (arah  $x$  dan arah  $y$ ).
- Setiap *ground motion* akan menghasilkan *response spectrum* (arah  $x$  dan arah  $y$ ).
- Dalam proses *spectra matching*, *response spectrum* yang digunakan merupakan nilai *geomean* dengan menggunakan persamaan 2.12.
- Nilai *geomean* dari semua *spectrum* (dari *ground motion*) tidak boleh lebih kecil dari 110% *target response spectrum* sesuai *period range*, seperti pada Gambar 2.14.

Pada Gambar 2.14 terlihat bahwa terjadi perubahan secara signifikan pada pola dari *response spectrum* yang telah dilakukan *spectra matching*. Dan pola dari *ground motion* tersebut mengalami perubahan. Pada Gambar 2.15 merupakan *ground motion* yang telah dilakukan *spectra matching* dan akan digunakan sebagai beban gempa dalam proses *nonlinier time history analysis*. Dengan demikian, *ground motion* hasil penyesuaian ini diharapkan mampu mencerminkan kondisi seismik yang lebih akurat dalam evaluasi performa struktur.



Gambar 2.14 Perbandingan *response spectrum* antara *matched* dan *original* dengan metode *spectra matching*.

Sumber: Lesmana (2020)



Gambar 2.15 Perbandingan *ground motion* antara *matched* dan *original*.

Sumber: Lesmana (2020)

### 2.3.3.3 Pertimbangan dalam memilih *scaling* atau *matching*

Beberapa pertimbangan untuk memilih metode yang tepat untuk modifikasi *ground motion* sesuai *NIST GCR 11-917-15* dan *ASCR 7-16*, antara lain:

a. *Amplitude-scaled*

- Jika hasil yang diinginkan dari analisis *Nonlinear Time History Analysis (NLTHA)* berupa *distribution of response*, maka metode *amplitude-scaled* sangat dianjurkan.
- *Amplitude-scaled* kurang optimal bila digunakan untuk mencari respon rata-rata (*average response*) dari analisis *Nonlinear Time History Analysis (NLTHA)* dari sebuah struktur. Meski demikian, hal tersebut masih diijinkan bila ingin tetap digunakan.
- *Amplitude-scaled* sangat dianjurkan untuk menganalisis lokasi yang tergolong *near-fault*. Karena data *ground motion* dari proses *scaling* tidak mengalami perubahan sehingga karakteristik dari *ground motion* tersebut tetap ada, khususnya *pulse characteristic* dari *ground motion*.
- *Amplitude-scaled* disarankan bila target *response spectrum* yang digunakan berupa

*CS (conditional spectrum)* yang bertujuan pada *distribution of response*.

b. *Spectral Matching*

- *Spectral matching* tidak cocok untuk menilai *probability* (kemungkinan) dari kegagalan *shear wall*. Hal ini dikarenakan, dalam proses *matching*, terdapat karakteristik khusus (*inherent*) dari *ground motion* yang hilang/berubah.
- Bila hasil analisis *Nonlinear Time History Analysis (NLTHA)* yang diinginkan berupa nilai *average story drift*, maka *spectral matching* sangat disarankan. Hal ini dikarenakan proses *spectral matching* bisa mengurangi *variability of jaggedness* (variasi dari bentuk *response spectrum* yang bergerigi) dari *response spectrume*, sehingga bentuk *spectrume* lebih *smooth* (halus).
- *Spectral matching* sangat baik untuk memprediksi *average response* (nilai rata-rata) dari respon struktur.
- *Spectral matching* tidak disarankan untuk lokasi yang tergolong *near-fault*, kecuali *pulse characteristic* dari *ground motion* dapat dipertahankan setelah proses *matching* selesai.
- *Spectral matching* disarankan bila target *response spectrum* yang digunakan berupa *UHS (uniform hazard spectrum)* atau *CMS (conditional mean spectrum)* yang bertujuan pada *average response*.

## 2.4 Metode *Dynamic Analysis*

*Dynamic analysis* adalah metode pengujian atau analisis sistem yang dilakukan dengan cara menjalankan program atau sistem tersebut untuk memantau perilakunya secara real-time. Metode ini sering digunakan dalam berbagai bidang, termasuk pengembangan perangkat lunak, keamanan komputer, dan analisis malware. Fokus utama dari *dynamic analysis* adalah untuk mengamati cara kerja sistem atau program dalam lingkungan yang mendekati kondisi operasional sebenarnya. Analisis *dynamic nonlinear* dapat digunakan untuk analisis seismik bangunan. Dalam model tersebut, elemen struktur dikenai gaya gempa yang telah ditentukan atau direncanakan. Hal ini diwakili oleh catatan riwayat waktu pergerakan tanah selama interval waktu tertentu. Pada analisis *dynamic nonlinear*, perpindahan rencana tidak ditentukan dari target perpindahan, melainkan ditentukan langsung melalui analisis dinamik dengan menggunakan riwayat waktu gerak gempa. Pada analisis dinamis nonlinier ini, beban gempa yang termasuk dalam beban struktur merupakan rekaman gerak gempa akibat gempa yang terjadi. Analisis *dynamic nonlinear* ini menggunakan beberapa catatan riwayat waktu gerakan tanah yang diperoleh dari database gerakan tanah PEER *Ground Motion Database NGA-West2*.

### 2.4.1 *Fast Nonlinear Analysis (FNA)*

*Fast nonlinear analysis* adalah metode analisis modal yang berguna untuk evaluasi statis atau dinamis sistem struktur linier atau nonlinier. Karena metode ini yang efisien dan sangat cocok untuk analisis *nonlinear time history*. Selama penerapan *FNA*, model analitik harus memiliki kriteria berikut.

- Dimodelkan bersifat *linear-elastic*.

- Memiliki sejumlah anggota *nonlinear* yang telah ditentukan sebelumnya.
- Mengabungkan perilaku *nonlinear* dalam objek *link*.

Selain hubungan gaya-deformasi material *nonlinear*, objek penghubung ini dapat mensimulasikan perangkat peredam terkonsentrasi, isolator, dan teknologi penghilang energi lainnya. Jika mekanisme sering tidak menjadi bagian integral dari tujuan desain, analisis elastis awal dapat mengungkapkan lokasi di mana inelastisitas mungkin terjadi. Namun, yang terbaik adalah selalu mendefinisikan mekanisme inelastis sedemikian rupa sehingga desainnya dapat memberikan keuletan yang cukup, sementara sistem elastis dipastikan memiliki kekuatan yang cukup. Desain kapasitas menyediakan model yang lebih andal dan struktur dengan kinerja yang lebih baik.

Efisiensi formulasi *FNA* sebagian besar disebabkan oleh pemisahan vektor gaya objek *nonlinear*  $R_{NL}(t)$  dari matriks kekakuan elastis dan persamaan gerak teredam, seperti yang terlihat pada persamaan keseimbangan fundamental *FNA*, yang dinyatakan sebagai berikut:

$$M_{\ddot{u}}(t) + C_{\dot{u}}(t) + K_u(t) + R_{NL}(t) = R(t) \quad (2.13)$$

Dengan mengikuti prosedur ini, *FNA* merupakan aplikasi dinamis-nonlinier yang efisien dan akurat yang memenuhi hubungan kesetimbangan, deformasi gaya, dan kompatibilitas.

#### 2.4.2 *Direct Integration Time History Analysis*

*Direct integration time history analysis* adalah metode analisis dinamis *nonlinear* yang mengintegrasikan persamaan kesetimbangan gerak saat struktur mengalami pembebanan dinamis. Analisis ini melibatkan integrasi sifat dan perilaku struktur pada serangkaian Langkah waktu yang relatif kecil terhadap durasi pembebanan. Persamaan gerak yang dievaluasi dinyatakan sebagai berikut:

$$M_{\ddot{u}}(t) + C_{\dot{u}}(t) + K_u(t) = F(t) \quad (2.14)$$

Dengan mengikuti prosedur ini, *Direct* merupakan serangkaian langkah waktu yang relatif kecil terhadap durasi pembebanan.

#### 2.4.3 *Fast Nonlinear Analysis (FNA) vs Direct Integration Time History Analysis*

*Fast Nonlinear Analysis*, juga dikenal sebagai Analisis Nonlinier Cepat (*FNA*), umumnya lebih akurat dan efisien dibandingkan dengan *Direct Integration Time History Analysis*. Keakuratan metode *FNA* bergantung pada kecukupan bentuk mode yang sesuai, mirip dengan bagaimana *Direct Integration* yang membutuhkan *time step* yang cukup kecil untuk mengkarakteristik perilaku dinamis secara akurat.

Redaman ditangani secara berbeda antara kedua metode analisis ini. *FNA* membatasi redaman proporsional pada frekuensi ekstrem hingga 0,99995 dari frekuensi kritis, sedangkan *Direct Integration* menggunakan redaman proporsional massa dan kekakuan dimana redaman pada frekuensi sangat rendah dan sangat tinggi dapat melebihi kritis. Pada penggunaan

toleransi konvergensi disarankan menggunakan nilai 0,0001 untuk penerapan metode *FNA*, dan untuk *Direct Integration* toleransi sama dengan atau kurang dari 0,001.

Hasil yang diperoleh mungkin sensitif terhadap parameter fisik, kondisi pembebanan, dan teknik analisis yang diterapkan. Terutama dengan struktur tidak beraturan dan system *nonlinear* tingkat lanjut. Karena *FNA* adalah metode analisis yang akurat dan efisien, Teknik ini mungkin bermanfaat untuk diterapkan pada serangkaian model yang mensimulasikan skenario komputasi variabel. Misalnya, pegas pondasi dan substruktur dapat dimasukkan, kemudian dihilangkan, untuk memberikan studi perbandingan. Dan untuk perbandingan yang lainnya plot energi hanya tersedia pada metode *Fast Nonlinear Analysis (FNA)* dan bukan pada *Direct Integration Time History Analysis*. Adapun ringkasan perbandingan *FNA* dengan *Direct Integration Time History Analysis* dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Perbandingan *FNA* dengan *Direct Integration Time History Analysis*.

Parameter	<i>Fast Nonlinear Analysis (FNA)</i>	<i>Direct Integration Time History Analysis</i>
<b>Keakuratan dan efisien</b>	Sedang – baik pada nonlinear ringan, sangat cepat	Sangat akurat untuk nonlinear besar, lebih lambat, komputasi berat.
<b>Redaman (Damping)</b>	Membatasi redaman proporsional pada frekuensi ekstrem hingga 0,99995 dari frekuensi kritis	Menggunakan redaman proporsional massa dan kekauan, dimana redaman pada frekuensi sangat rendah dan sangat tinggi dapat melebihi kritis.
<b>Toleransi konvergensi (<i>convergen</i>)</b>	0,0001 atau (1e-4)	0,001 atau (1e-3)
<b>Plot energi</b>	Terbatas	Lengkap dan presisi

Sumber: Lesmana (2020)

Sedangkan untuk metode *Hilber-Huges-Taylor (HHT)* dengan nilai  $0 < a \leq -1/3$ , ketika  $a = 0$  nilai tersebut sebenarnya sudah cukup dengan berbagai persoalan, akan tetapi bisa menggunakan nilai *alpha* lebih kecil dari nol hingga  $-1/3$  jika terjadi permasalahan konvergensi. Adapun merubah *alpha* dengan cara *trial and error* hingga mendapatkan nilai yang akurat. Dan perlu diperhatikan juga bahwa semua *node* harus memiliki massa, dan rotasi inersia yang dapat ditambahkan untuk meningkatkan respon dinamis.

## 2.5 Macam Alat Peredam Gempa

Berikut adalah beberapa macam alat peredam gempa yang umum digunakan untuk mengurangi dampak getaran gempa bumi:

1. *Base Isolators*: Alat ini dipasang di antara fondasi bangunan dan struktur di atasnya. *Base isolators* dapat menyerap dan mengurangi energi gempa yang diteruskan ke bangunan. Dengan penerapan sistem ini, respon dinamis bangunan menjadi jauh lebih kecil sehingga meningkatkan tingkat keamanan dan kenyamanan penghuni selama terjadinya gempa. Selain itu, sistem base isolation mampu memperpanjang periode alami struktur

sehingga gaya seismik yang bekerja dapat berkurang secara signifikan. Adapun contoh dari *base isolators* dapat dilihat pada Gambar 2.16.

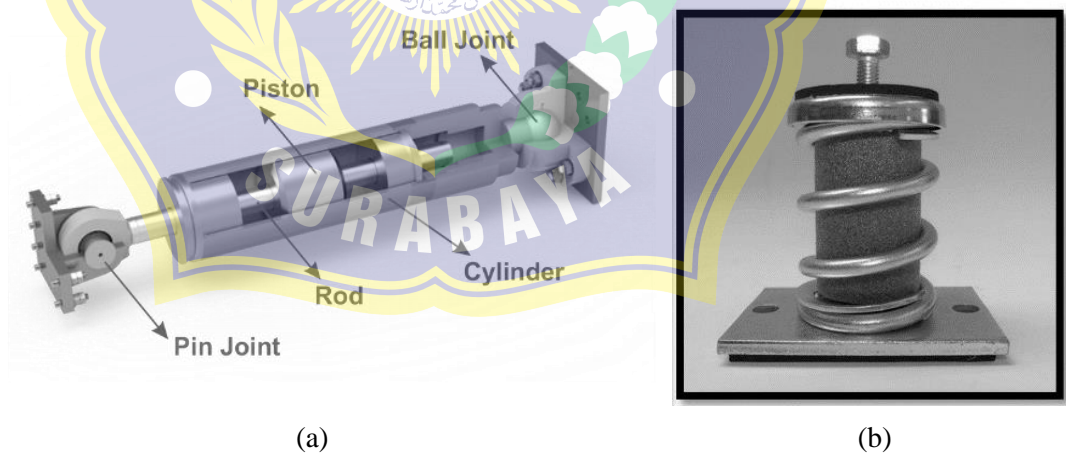


Gambar 2.16 *Base Isolators*.

Sumber: HISCS (2020)

## 2. Dampers

- *Viscous Dampers*: Menggunakan cairan kental untuk menyerap energi. Ketika bangunan bergetar, cairan ini bergerak dan menyerap energi. (Dapat dilihat pada Gambar 2.17a).
- *Metallic Dampers*: Menggunakan deformasi plastik untuk menyerap energi gempa. (Dapat dilihat pada Gambar 2.17b).

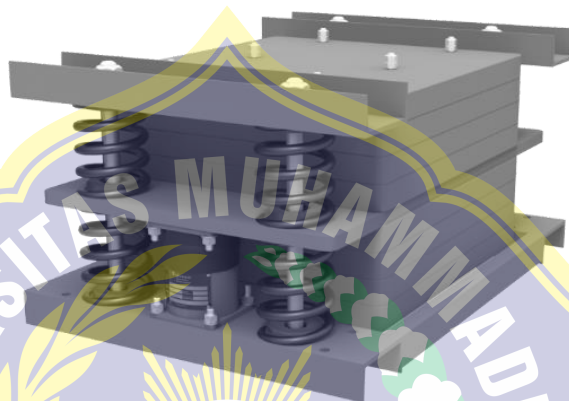


Gambar 2.17 (a) *Viscous dampers*; (b) *Metallic dampers*.

Sumber: Constructionplusasia (2021); Eganasl (2024)

3. *Tuned Mass Dampers (TMD)* : Adalah perangkat peredam getaran pasif yang terdiri dari massa tambahan, pegas, dan sistem redaman yang dipasang pada struktur untuk mengurangi respons dinamik akibat beban gempa atau angin. Prinsip kerjanya adalah mengimbangi gerakan bangunan dengan menghasilkan gaya inersia yang berlawanan

arah, sehingga amplitudo getaran pada struktur utama berkurang secara signifikan. TMD biasanya ditempatkan pada lantai paling atas bangunan atau lokasi dengan amplitudo getaran terbesar. Sistem ini sangat efektif untuk bangunan tinggi, jembatan, dan menara, terutama dalam meredam getaran lateral dengan frekuensi rendah. TMD memiliki performa optimal ketika frekuensi alami massa tambahan disetel (tuned) dengan frekuensi dominan struktur, sehingga energi getar dapat diserap secara efisien. Sistem ini terdiri dari massa besar yang dipasang di bagian atas bangunan. TMD bergetar dengan frekuensi yang sama dengan bangunan saat terjadi gempa, sehingga dapat mengurangi amplitudo getaran. (Dapat dilihat pada Gambar 2.18).



Gambar 2.18 *Tuned Mass Dampers (TMD)*.  
Sumber: Lisega (2024)

4. *Seismic Bracing*: Adalah sistem pengaku (bracing) yang dipasang pada struktur bangunan maupun sistem non-struktural (seperti pipa, kabel, ducting, dan peralatan mekanikal) untuk menahan gaya lateral akibat gempa. Tujuannya agar elemen yang ditopang tidak bergeser, jatuh, atau rusak saat terjadi getaran gempa. Struktur tambahan yang dipasang di dalam bangunan untuk meningkatkan kekakuan dan stabilitas. Ini sering berupa batang diagonal. (Dapat dilihat pada Gambar 2.19).



Gambar 2.19 *Seismic bracing*.  
Sumber: Tectonus (2022)

5. *Flexible Joints*: Adalah sambungan fleksibel yang digunakan untuk menyerap pergerakan, getaran, deformasi, dan perpindahan pada struktur atau sistem perpipaan. Alat ini memungkinkan dua elemen yang terhubung untuk tetap bergerak bebas satu sama lain tanpa menimbulkan kerusakan. Digunakan untuk menghubungkan bagian-bagian bangunan yang dapat bergerak secara terpisah, sehingga mengurangi stres akibat pergerakan. (Dapat dilihat pada Gambar 2.20).



Gambar 2.20 *Flexible joints*.

Sumber: Generalea (2024)

6. *Retrofitting*: Metode ini melibatkan penguatan bangunan yang sudah ada dengan menambahkan elemen peredam gempa, seperti kolom dan balok tambahan. (Dapat dilihat pada Gambar 2.21).

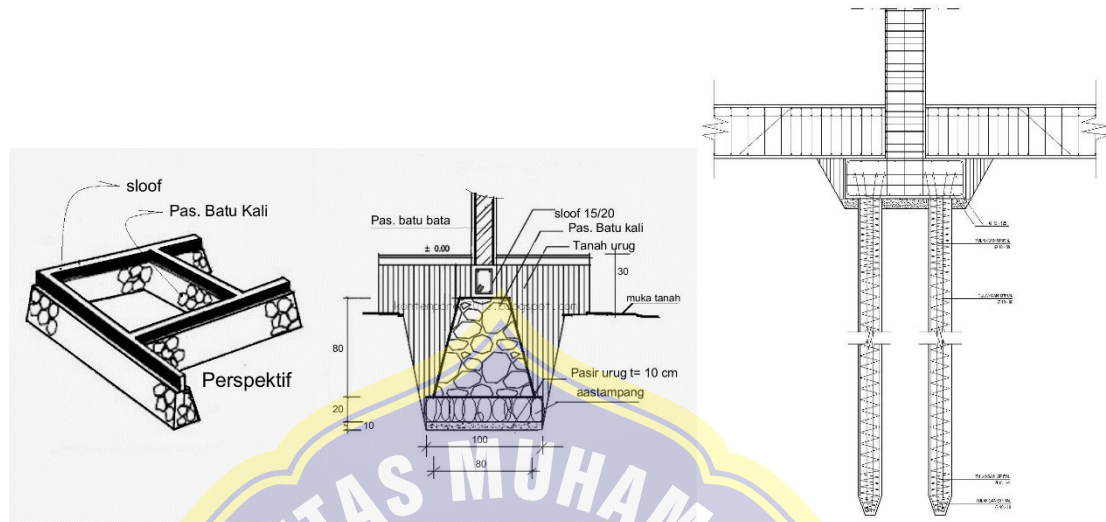


Gambar 2.21 *Retrofitting*.

Sumber: Srdlbd (2024)

7. Sistem Pondasi Dalam (*Deep Foundations*): Adalah jenis pondasi yang dirancang untuk menyalurkan beban struktur ke lapisan tanah yang lebih dalam dan lebih kuat ketika kondisi tanah permukaan tidak cukup mendukung. Pondasi dalam bekerja dengan cara memindahkan beban ke kedalaman melalui elemen-elemen struktural seperti tiang pancang (*driven piles*), *bored pile*, *caisson*, atau *drilled shafts*. Sistem ini mampu

menahan beban vertikal, lateral, maupun gaya uplift, sehingga sangat cocok digunakan pada bangunan bertingkat tinggi, jembatan, dermaga, serta konstruksi di atas tanah lunak atau berlapis-lapis. (Dapat dilihat pada Gambar 2.22).



Gambar 2.22 Sistem pondasi dalam (*deep foundation*).

Sumber: Duniatekniksipil (2017)

## 2.6 Base Isolation

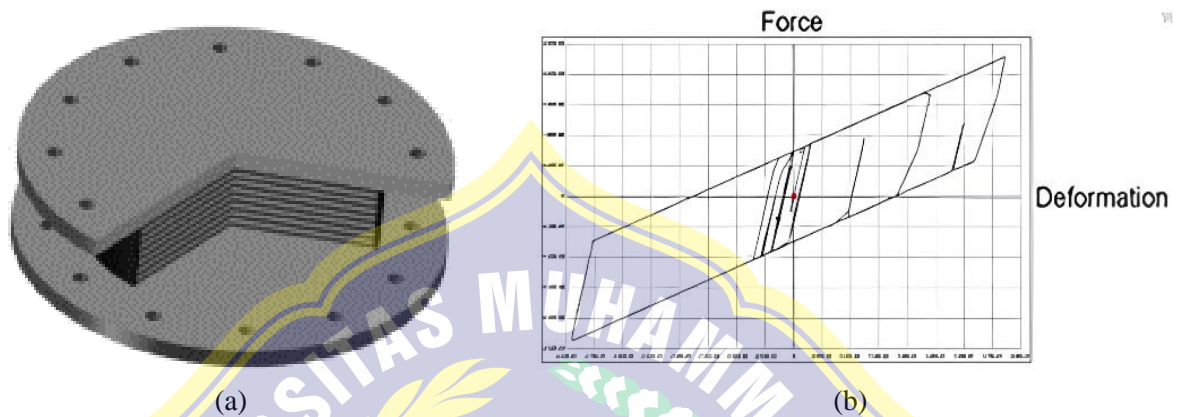
Sistem isolasi dasar menggunakan material khusus peredam getaran (*seismic isolator*) yang terletak diantara bangunan dengan pondasi dasar untuk mencegah getaran gempa langsung mengenai struktur. Tujuannya untuk memperbesar waktu getar alami struktur ( $T$ ) akibat gempa, sehingga beban gempa yang mengenai struktur menjadi lebih kecil dan tidak membahayakan struktur beserta isinya (Tjokrodinuljo, 1993). *Base isolation* merupakan konsep memisahkan struktur atas dengan struktur bawah yang bekerja dengan menjaga struktur di atasnya menjadi satu kesatuan. *Base isolation* memiliki sifat elastis maka arah getaran gempa yang terjadi secara acak hanya akan mempengaruhi *base isolation*, sedangkan struktur di atasnya akan bergetar atau bergerak sebagai satu kesatuan.

Ada banyak jenis alat peredam gempa yang dapat digunakan, pada penelitian kali ini digunakan sistem isolasi dengan tipe *High Damping Rubber Bearing (HDRB)* dan *Friction Pendulum System (FPS)*. Sistem *High Damping Rubber Bearing (HDRB)* menggunakan karet untuk mengurangi getaran gempa sedangkan lempengan baja yang terdapat pada lapisan berfungsi untuk menambah kekakuan bantalan karet sehingga defleksi dan deformasi bangunan saat bertumpu diatas bantalan karet tidak besar.

### 2.6.1 Head-Damping Rubber Bearing (HDRB)

*High-damping rubber bearing* merupakan salah satu jenis *laminated rubber bearing* yang terbuat dari campuran senyawa karet dengan nilai rasio redaman yang tinggi. *High-damping rubber bearing* memiliki nilai kekakuan awal yang tinggi sehingga mampu mengakomodasi gaya angin dan gempa ringan tanpa berdeformasi secara signifikan. Dengan meningkatnya

eksitasi gempa maka deformasi lateral akan meningkat dan modulus geser dari *rubber* akan menurun dan menghasilkan sistem isolasi dasar yang efektif (cukup fleksibel untuk memperpanjang periode struktur). Pada nilai regangan geser 250 hingga 300%, kekakuan horizontal akan meningkat kembali akibat pengaruh *hardening effects*. Pengaruh ini berfungsi sebagai “sekring” untuk membatasi deformasi yang melebihi batas gempa maksimum yang direncanakan. Perangkat HDRB dan kurva histeretik yang dihasilkan diberikan pada Gambar 2.23a dan Gambar 2.23b di bawah ini.



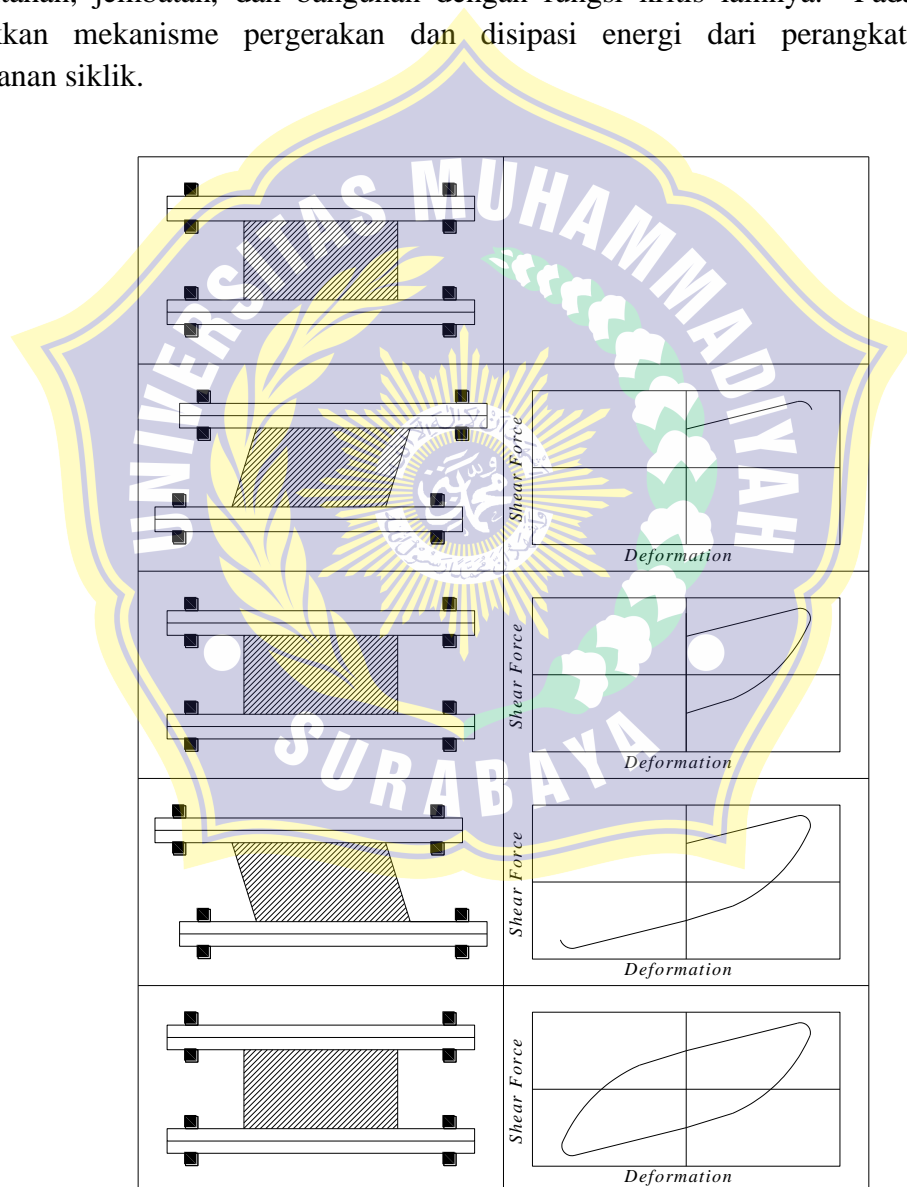
Gambar 2.23 (a) Perangkat HDRB; (b) kurva histeristik yang dihasilkan.

Sumber: Fundamental Concepts of Earthquake Engineering : Villaverde (2009)

*High Damping Rubber Bearing (HDRB)* merupakan salah satu jenis *base isolator elastomeric* yang terdiri dari lapisan karet dan pelat baja tipis yang disusun secara berlapis menggunakan proses vulkanisasi. Isolator ini dirancang untuk mengurangi gaya gempa yang diterima bangunan dengan cara memberikan fleksibilitas lateral serta menghasilkan redaman energi yang tinggi melalui sifat viskoelastis material karetnya. Pada kondisi beban ringan seperti angin atau getaran kecil, HDRB menunjukkan kekakuan awal (*initial stiffness*) yang besar sehingga bangunan tidak mengalami deformasi yang berlebihan. Namun ketika intensitas gempa meningkat, HDRB secara bertahap menurunkan kekakuannya sehingga struktur dapat bergoyang lebih bebas, yang pada akhirnya meningkatkan periode natural bangunan dan mengurangi gaya inersia akibat gempa. HDRB mampu mengalami deformasi geser hingga 250–300% dari tebal lapisan karetnya sebelum mencapai batas aman desain. Ketika deformasi mendekati batas tersebut, isolator menunjukkan *hardening effect*, yaitu peningkatan kembali kekakuan horizontal sebagai mekanisme pengamanan agar perpindahan total tidak melebihi displacement maksimum yang diizinkan.

Material karet pada HDRB telah dimodifikasi menggunakan bahan aditif khusus sehingga menghasilkan nilai redaman efektif yang jauh lebih besar dibandingkan elastomeric bearing konvensional, yaitu sekitar 10–20%. Kemampuan redaman ini memungkinkan HDRB mengubah energi kinetik dari pergerakan gempa menjadi energi histeretik yang dilepaskan dalam bentuk panas, sehingga respons struktur terhadap gempa dapat menurun secara signifikan. Pelat baja tipis yang tersisip di antara lapisan karet berfungsi menjaga agar deformasi berdominasi horizontal, sekaligus memungkinkan isolator menahan beban vertikal

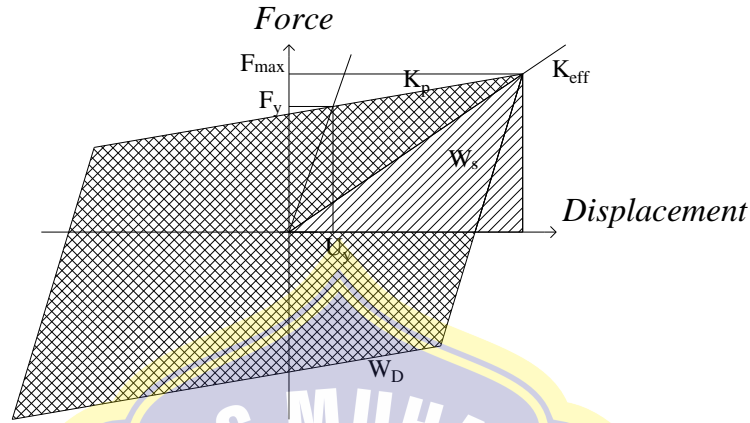
yang besar tanpa mengalami penurunan stabilitas. HDRB juga dirancang memiliki ketahanan yang tinggi terhadap siklus pembebanan berulang sehingga tetap efektif saat terjadi aftershock. Keunggulan lain HDRB adalah tidak memerlukan perangkat tambahan seperti damper eksternal karena sifat redaman sudah terintegrasi pada materialnya. Selain itu, HDRB memiliki tingkat pemeliharaan yang rendah karena tidak mengandung komponen mekanis yang bergerak sehingga risiko kerusakan sangat kecil. Dalam proses perencanaannya, HDRB harus melewati pengujian *cyclic loading* untuk memastikan sifat kekakuan dan redamannya sesuai dengan spesifikasi teknis. Secara keseluruhan, HDRB memberikan kombinasi ideal antara fleksibilitas lateral, redaman tinggi, dan keamanan struktural sehingga menjadi salah satu tipe isolator paling banyak digunakan pada bangunan penting seperti rumah sakit, pusat pemerintahan, jembatan, dan bangunan dengan fungsi kritis lainnya. Pada Gambar 2.24 ditunjukkan mekanisme pergerakan dan disipasi energi dari perangkat HDRB pada pembebanan siklik.



Gambar 2.24 Mekanisme pergerakan dan pembentukan kurva histeristik pada perangkat *High Damping Rubber Bearing (HDRB)*.

Sumber: Jurnal ITB (2014)

Nilai kekakuan dan redaman dari HDRB bergantung pada besarnya nilai *shear strain* yang terjadi. Pada pemodelan linear, umumnya digunakan pendekatan nilai kekakuan efektif ( $K_{eff}$ ) dan redaman efektif ( $\xi_{eff}$ ) untuk menggambarkan nilai kekakuan dan redaman pada suatu nilai perpindahan tertentu seperti diperlihatkan pada Gambar 2.25.



Gambar 2.25 Parameter kekakuan efektif ( $K_{eff}$ ) dan redaman efektif ( $\xi_{eff}$ ) pada perangkat HDRB.

Sumber: FEMA P-751 Chapter 12, Seismically Isolated Structures (3)

Besarnya nilai kekakuan dan redaman efektif berturut-turut diberikan pada persamaan (2.15) dan (2.16) sebagai berikut:

$$K_{eff} = \frac{K_i u_y + K_p (u_{max} - u_y)}{u_{max}} = (K_i - K_p) \frac{u_y}{u_{max}} + K_p \quad (2.15)$$

$$\xi_{eff} = \frac{1}{4\pi} \frac{W_D}{W_S} \quad (2.16)$$

Dimana besarnya nilai  $W_D$  dan  $W_S$  ditentukan melalui persamaan 2.17 berikut:

$$\begin{aligned} W_D &= 4(K_i - K_p)u_y(u_{max} - u_y) \\ W_S &= \frac{K_{eff}u_{max}^2}{2} \end{aligned} \quad (2.17)$$

dimana:

$K_i$  = kekakuan awal (*initial stiffness*)

$K_p$  = kekakuan paska kelelahan (*postyield stiffness*)

$u_y$  = deformasi leleh

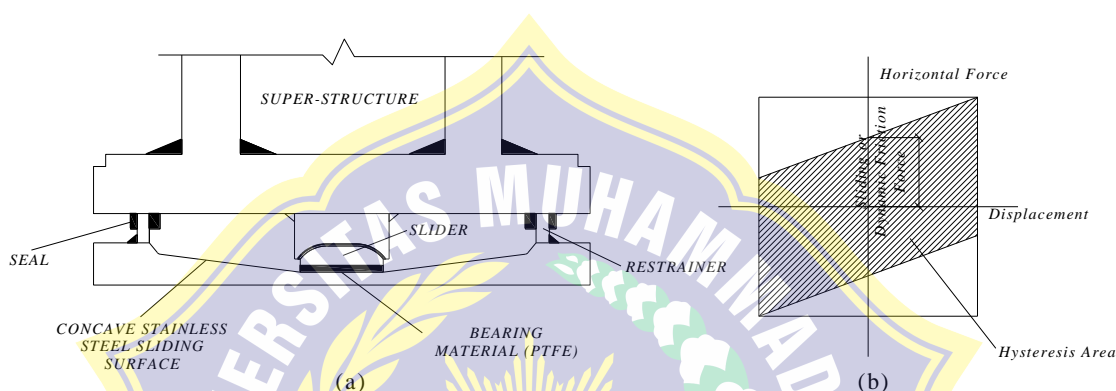
$u_{max}$  = deformasi maksimum pada suatu siklus pembebanan tertentu

$W_D$  = energi histeretik (direpresentasikan melalui luasan kurva histeretik)

$W_S$  = energi regangan elastik pada *linear equivalent system*

## 2.6.2 Friction Pendulum System (FPS)

Salah satu kelebihan utama yang dimiliki oleh perangkat *friction pendulum system* adalah kemampuannya untuk mengembalikan struktur pada posisi semula setelah gempa berakhir. Hal ini dapat terjadi karena adanya bagian *articulated slider* yang bergerak pada suatu permukaan *stainless-steel* yang berbentuk cekung dengan nilai kelengkungan tertentu. Dengan adanya tahanan friksi pada kedua permukaan tersebut maka struktur di atas sistem isolasi dasar akan tetap berperilaku layaknya sebuah struktur terjepit (*fixed-base structure*) pada kondisi beban lateral yang ringan. Perangkat FPS dan kurva histeretik yang dihasilkan diberikan pada Gambar 2.26a dan Gambar 2.26b.

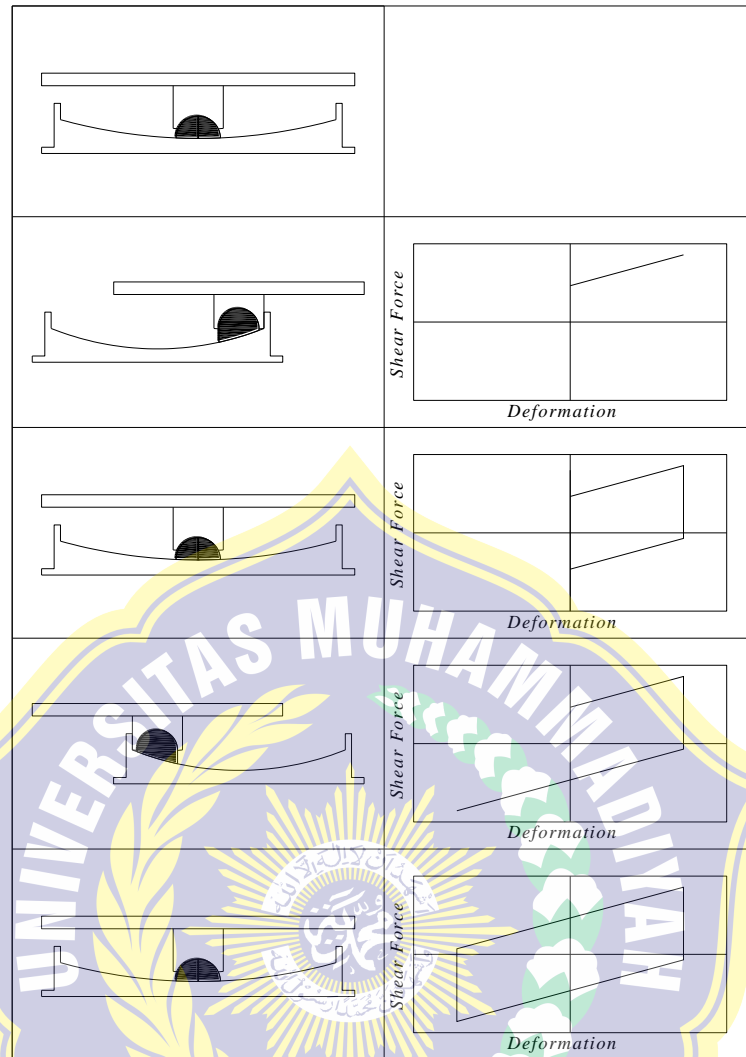


Gambar 2.26 (a) Perangkat *Friction Pendulum System (FPS)*; (b) kurva histeristik yang dihasilkan.

Sumber: Modelling Aspects of Structures Isolated With The Frictional Pendulum System (Jose, et.al., 1998)

Ketika gaya friksi batas terlampaui, struktur akan bergerak layaknya sebuah bandul harmonik sederhana. Periode natural dari perangkat FPS dapat didekati dengan persamaan periode alami untuk bandul sederhana sedangkan disipasi energi akan didapatkan dari friksi di antara kedua permukaan yang telah dijelaskan sebelumnya. Pada Gambar 2.27 ditunjukkan mekanisme pergerakan dari FPS pada beban siklik akibat gempa.

Secara lebih detail, ketika struktur mulai bergeser, slider pada FPS akan mengikuti lintasan cekung sambil menghasilkan gaya friksi yang hampir konstan, sehingga gaya gempa yang diteruskan ke struktur atas menjadi lebih kecil dan lebih terkontrol. Setiap siklus pergerakan menghasilkan kehilangan energi (*energy dissipation*) yang tampak pada kurva histeresis berbentuk persegi atau rounded rectangle, menandakan karakteristik redaman yang kuat. FPS juga memiliki kemampuan untuk mengembalikan struktur ke posisi semula setelah gaya gempa mereda karena adanya gaya pemulih gravitasi yang bekerja sepanjang kelengkungan permukaan pendulum. Kombinasi antara periode yang diperpanjang dan redaman dari gaya friksi membuat FPS sangat efektif dalam mengurangi respon percepatan dan simpangan pada struktur bangunan. Selain itu, perangkat FPS dapat disesuaikan melalui pemilihan radius kelengkungan dan koefisien friksi sehingga performanya dapat dioptimalkan untuk tingkat risiko gempa tertentu dan karakteristik tanah setempat.



Gambar 2.27 Mekanisme pergerakan dan pembentukan kurva histeristik pada perangkat *Friction Pendulum System (FPS)*.  
 Sumber: Jurnal ITB (2014)

Nilai kekakuan dan redaman dari FPS bergantung pada besarnya nilai perpindahan yang terjadi pada *bearing*. Pada pemodelan linear, umumnya digunakan pendekatan nilai kekakuan efektif ( $K_{eff}$ ) dan redaman efektif ( $\xi_{eff}$ ) untuk menggambarkan nilai kekakuan dan redaman pada suatu nilai perpindahan tertentu seperti diperlihatkan pada Gambar 2.28.

Besarnya nilai kekakuan dan redaman efektif berturut-turut diberikan pada Persamaan (2.18) dan (2.19) sebagai berikut:

$$K_{eff} = \frac{\mu_{sgn(\dot{u})}W(t) + K_H u_{max}}{u_{max}} \quad (2.18)$$

$$\xi_{eff} = \frac{1}{4\mu} \frac{W_D}{W_S} = \frac{1}{4\pi} \frac{4(\mu W)u_{max}}{\frac{K_{eff}u_{max}^2}{2}} = \frac{2}{\pi} \left( \frac{\mu}{\mu + \frac{u_{max}}{R}} \right) \quad (2.19)$$

Kekakuan setelah *FPS* mengalami pergerakan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$K_H = \frac{W(t)}{R} \quad (2.20)$$

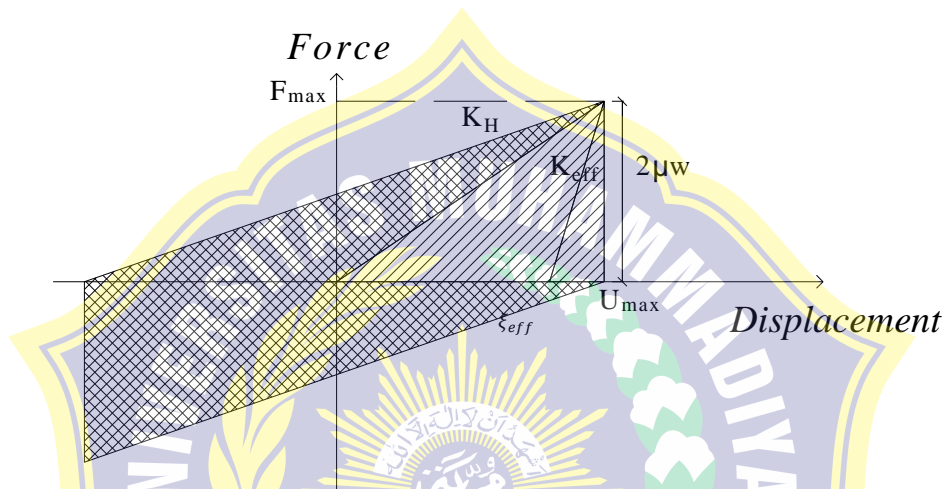
dimana:

$\mu_{sgn(\dot{u})}$  = Koefisien friksi dari *concave surface*.

$W(t)$  = Gaya aksial yang bekerja pada *bearing* (fungsi waktu).

$K_H$  = Kekakuan setelah *FPS* mengalami pergerakan ( $F > \mu W$ ).

$R$  = Jari-jari kelengkungan dari *concave surface*.



Gambar 2.28 Parameter kekuatan efektif ( $K_{eff}$ ) dan redaman efektif ( $\xi_{eff}$ ) pada perangkat *Friction Pendulum System (FPS)*.

Sumber: FEMA P-751 Chapter 12, *Seismically Isolated Structures* (2012)

## 2.7 Konsep Desain *Seismic Base Isolation*

Desain sistem isolasi dan prosedur evaluasi menghasilkan gaya geser maksimum, *displacement*, dan gaya pada struktur untuk setiap level gempa *DBE (Design Basis Earthquake)* dan *MCE (Maximum Capable Earthquake)*. Dalam desain gaya geser, sistem isolasi, pondasi dan semua elemen yang berada dibawah sistem *isolation*, didesain dengan gaya berikut.

$$V_B = K_{D \max} D_D \quad (2.21)$$

Dimana  $K_{D \max}$  adalah nilai kekakuan efektif maksimum dari sistem isolasi sedangkan  $D_D$  merupakan massa. Sedangkan rumus untuk gaya geser minimum struktur yang berada diatas isolator dapat dilihat pada persamaan 2.22.

$$V_S = \frac{K_{D \max} D_D}{R_I} \quad (2.22)$$

Ini merupakan gaya elastis pada sistem isolasi yang digunakan pada elemen yang berada dibawah isolator dengan nilai yang telah direduksi oleh faktor  $R_1$  (*Isolated*). Nilai  $V_S$  yang dihitung tidak boleh lebih kecil dari nilai dibawah ini.

1. Gaya gempa lateral untuk *fixed base structure* dengan berat ( $W$ ) yang sama dan periode yang sama ( $T_D$ ).
2. Gaya geser sesuai dengan desain beban angin.
3. Gaya lateral yang disyaratkan pada sistem isolasi dengan faktor 1,5.  
Adapun nilai R untuk *fixed base* dan *isolated structure* dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Nilai Faktor Reduksi (R) untuk *fixed-base* dan *isolated structure*.

<i>Structural System</i>	<i>Lateral Force Resisting System</i>	<i>Fixed Base (R)</i>	<i>Isolated (R<sub>t</sub>)</i>
<i>Bearing Wall System</i>	<i>Concrete Shear Walls</i>	4,5	2,0
	<i>Masonry Shear Walls</i>	4,5	2,0
	<i>Steel Eccentrically Braced Frame (EBF)</i>	7,0	2,0
<i>Building Frame System</i>	<i>Concrete Shear Walls</i>	5,5	2,0
	<i>Masonry Shear Walls</i>	5,5	2,0
	<i>Ordinary Steel Braced Frame</i>	5,6	1,6
	<i>Special Steel Concentric Braced Frame</i>	6,4	2,0
	<i>Special Moment Resisting Frame (SMRF)</i>		
<i>Momen Resisting Frame System</i>	<i>Steel</i>	8,5	2,0
	<i>Concrete</i>	8,5	2,0
	<i>Intermediate Moment Resisting Frame (IMRF)</i>		
	<i>Concrete</i>	5,5	2,0
	<i>Ordinary Moment Resisting Frame (OMRF)</i>		
	<i>Steel</i>	4,5	2,0
	<i>Shear Walls</i>		
	<i>Concrete with OMRF</i>	8,5	2,0
	<i>Concrete with steel OMRF</i>	4,2	2,0
	<i>Masonry with SMRF</i>	5,5	2,0
<i>Dual System</i>	<i>Masonry with Steel SMRF</i>	4,2	2,0
	<i>Steel EBF</i>		
	<i>With Steel SMRF</i>	8,4	2,0
	<i>With Steel OMRF</i>	4,2	2,0
	<i>Ordinary Braced Frames</i>		
	<i>Steel with Steel SRMF</i>	6,5	2,0
	<i>Steel with Steel OMRF</i>	4,2	2,0
	<i>Special Concrete Braced Frame</i>		
<i>Cantilever Column Building System</i>	<i>Steel with Steel SMRF</i>	7,5	2,0
	<i>Steel with Steel OMRF</i>	4,2	2,0
	<i>Cantilever column elements</i>	2,2	1,4

Sumber: Kelly (2001)

Pada umumnya koefisien geser dasar untuk *fixed-base* dapat dilihat pada persamaan 2.23.

$$C = \frac{C_V I}{RT} \quad (2.23)$$

Sedangkan untuk *isolated structure* memiliki persamaan 2.24.

$$C_1 = \frac{C_{VD}}{R_1 BT} \quad (2.24)$$

Adapun batasan *drift* untuk *isolated structure* dilihat dari desain sistem *structural* dapat dilihat pada persamaan 2.25 dan persamaan 2.26.

$$\text{Respon Spectrum Analysis} \quad \delta \leq 0,0015/R_I \quad (2.25)$$

$$\text{Time History Analysis} \quad \delta \leq 0,0020/R_I \quad (2.26)$$

## 2.8 Damage State

*Damage state* merupakan kategori atau tingkat kerusakan yang dialami suatu struktur ketika mendapatkan beban gempa, terutama dalam analisis berbasis kinerja (*performance-based seismic design*). Konsep ini digunakan untuk menggambarkan sejauh mana elemen struktur mengalami penurunan kapasitas akibat deformasi, *drift*, atau kerusakan material selama peristiwa seismik.

Secara umum, *damage state* diklasifikasikan dalam beberapa tingkat, mulai dari kerusakan ringan hingga kondisi mendekati runtuh. Parameter yang digunakan untuk menentukan *damage state* dapat berupa *story drift ratio*, *plastic hinge rotation*, *strain pada material*, atau *displacement residual* tergantung metode analisis yang digunakan. Dalam metode kegempaan *Nonlinear Time History Analysis (NLTHA)*, *damage state* dinilai berdasarkan respons dinamis aktual yang dialami struktur, sehingga hasilnya lebih realistis dibandingkan analisis statis.

### 2.8.1 Klasifikasi Damage State

Beberapa lembaga seperti FEMA, ATC, dan HAZUS mengelompokkan *damage state* menjadi empat tingkatan umum:

1. *Operational (OP)*

Struktur masih berfungsi penuh pasca-gempa, dengan kerusakan sangat ringan pada komponen non-struktural. *Drift* sangat kecil dan tidak mempengaruhi keamanan maupun kenyamanan penghuni. Bangunan tetap dapat dioperasikan tanpa perbaikan struktural.

2. *Immediate Occupancy (IO)*

Kerusakan ringan terjadi pada elemen non-struktural dan sedikit deformasi plastis pada elemen struktural. Struktur tetap aman untuk dihuni, namun beberapa perbaikan kecil

mungkin dibutuhkan. *Drift* masih berada pada batas aman dan tidak mengancam stabilitas.

3. *Life Safety (LS)*

Struktur mengalami kerusakan sedang dengan terbentuknya sendi plastis pada beberapa elemen penahan beban. Meskipun kerusakan signifikan, struktur masih mampu mempertahankan kestabilannya dan tidak runtuh. Penghuni harus dievakuasi karena risiko kerusakan lanjutan.

4. *Collapse Prevention (CP)*

Struktur mengalami kerusakan berat dan mendekati batas kapasitas maksimum. Banyak elemen mengalami deformasi berlebih atau perilaku inelastik intensif. Struktur masih berdiri, tetapi hanya dengan margin keamanan minimal. Risiko runtuh sangat tinggi apabila terjadi gempa susulan.

### 2.8.2 Parameter Penentu *Damage State*

Penilaian *damage state* biasanya menggunakan batasan tertentu, misalnya:

1. *Interstory Drift Ratio (IDR)*

Parameter paling umum untuk menilai kerusakan struktur gedung. Batasan tipikal (FEMA 356):

- *IO* :  $\pm 1\%$
- *LS* :  $\pm 2\%$
- *CP* :  $\pm 4\%$

2. *Plastic Rotation/Hinge Formation*

Digunakan pada elemen balok-kolom dengan mengacu pada kurva backbone (FEMA 440, ASCE 41).

3. *Residual Drift*

*Drift* tersisa setelah gempa berhenti. *Residual drift* besar menunjukkan struktur mengalami kerusakan permanen yang signifikan.

4. *Base Shear dan Displacement*

Tidak menentukan *damage state* secara langsung, tetapi menjadi indikator tingkat energi yang diterima struktur.

### 2.8.3 Pentingnya *Damage State* dalam Penelitian

Penggunaan *damage state* memiliki peran penting dalam analisis kinerja struktur, antara lain:

1. Menilai keamanan struktur terhadap peraturan terbaru.
2. Menentukan kelayakan bangunan pasca-gempa.
3. Memperbandingkan efektivitas metode retrofit.
4. Memberikan gambaran ekonomi rekonstruksi karena setiap *damage state* berhubungan dengan biaya perbaikan.
5. Membantu menentukan target *seismic performance* sesuai kategori bangunan.



Halaman ini sengaja dikosongkan