

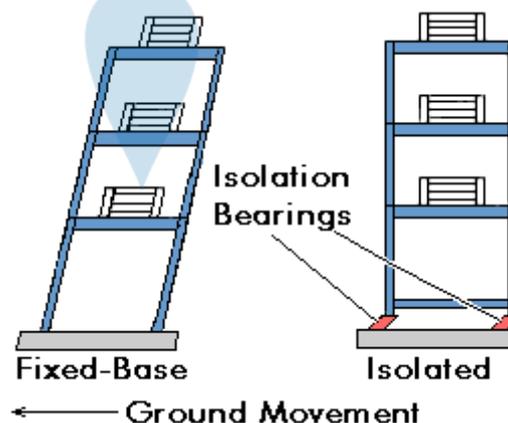
BAB II

LANDASAN TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Konsep *Base Isolated System*

Base isolated system merupakan suatu sistem yang bertujuan untuk melindungi struktur dari gaya-gaya horizontal yang kuat, seperti gaya gempa. Konsep utama dari sistem ini adalah memisahkan struktur atas dan struktur bawah yang mengalami pergerakan tanah akibat gempa dengan menyisipkan *base isolator* diantara struktur atas dan fondasi. Sistem ini memiliki nilai kekakuan yang rendah terhadap arah horizontal dan nilai kekakuan yang tinggi terhadap arah vertikal. Dengan konsep seperti ini, struktur mampu menahan beban vertikal yaitu beban aksial dari bangunan dan mampu juga menahan gaya-gaya lateral yaitu gerakan tanah akibat getaran dari gempa.

Hal yang membedakan *base isolated system* adalah caranya sistem ini menahan gaya lateral tersebut. Struktur bawah yang terisolasi akan bergerak mengikuti arah pergerakan tanah akibat gaya gempa sedangkan struktur atas akan berperilaku sebagai *rigid body motion* yang bergerak mengikuti *base isolator*.



Gambar 2.1. Konsep *Base Isolated System*

Sumber: Muliadi, Afifuddin dan Aulia. (2017). *Jurnal Teknik Sipil PORTAL Vol. 9, No. 1, April 2017.*

Diakses melalui <http://e-jurnal.pnl.ac.id> , 17 November 2020

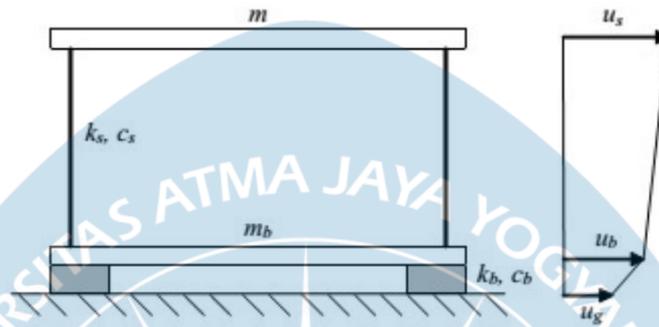
Dengan sistem seperti ini, struktur atas akan mengalami frekuensi yang lebih kecil dibandingkan dengan bangunan konvensional dan frekuensi pergerakan tanah. Jika frekuensi yang terjadi pada struktur semakin kecil maka akan menghasilkan waktu getar struktur yang lebih lama. Dengan begitu percepatan pada struktur akan berkurang juga. Saat percepatan pada struktur berkurang, gaya yang terjadi pada struktur akan tereduksi. Hal ini berdasar dari Hukum Newton II yang berbunyi “percepatan pada sebuah benda akan sebanding dengan resultan gaya yang bekerja pada benda tersebut”. Maka saat percepatan pada bangunan mengecil, gaya gempa yang bekerja pada bangunan juga akan berkurang.

Ragam getar pertama dari struktur terisolasi hanya melibatkan deformasi pada sistem isolasi, sedangkan struktur atas akan tetap berperilaku kaku. Ragam getar yang lebih tinggi akan menghasilkan deformasi yang ortogonal terhadap ragam getar pertama dan gerakan tanah. Ragam getar yang lebih tinggi ini tidak berpartisipasi dalam gerakan, sehingga energi tinggi pada gerakan tanah pada frekuensi yang lebih tinggi ini tidak dapat disalurkan ke dalam struktur. Sistem isolasi tidak menyerap energi gempa tetapi membelokkannya melalui dinamika sistem, efek ini tidak bergantung pada redaman, tetapi tingkat redaman tertentu bermanfaat untuk menekan kemungkinan resonansi pada frekuensi isolasi. (Naeim and Kelly, 1999).

Resonansi merupakan peristiwa dimana bangunan ikut bergetarnya suatu gedung karena getaran kuat seperti gempa bumi. Bangunan dapat mengalami resonansi apabila frekuensi natural pada struktur sama dengan frekuensi getaran tanah atau gempa bumi (Nakamura, 2000). Resonansi akan membuat respon yang terjadi lebih besar dan mengakibatkan kerusakan yang lebih besar pada bangunan. Sehingga *base isolated system* akan kurang efektif jika terjadi pada bangunan yang mengalami resonansi.

2.1.2. Teori Linier Isolasi Seismik

Teori ini dikemukakan oleh Naeim and Kelly (1999). Konsep dasarnya dapat digambarkan dengan ilustrasi sebagai berikut.



Gambar 2.2 Parameter sistem isolasi 2 derajat kebebasan (Naeim and Kelly, 1999)

Massa m adalah massa dari superstruktur bangunan tersebut sendiri dan massa m_b adalah massa lantai dasar di atas *isolated system*. k_s adalah kekakuan struktur dan c_s adalah redaman. Untuk bangunan dengan *isolated system*, kekakuan struktur dan redaman akan disimbolkan dengan k_b dan c_b . Perpindahan absolut kedua massa adalah u_s dan u_b , tetapi dalam perhitungan akan lebih nyaman menggunakan perpindahan relatif.

$$v_b = u_b - u_g \quad (2-1)$$

$$v_s = u_s - u_b \quad (2-2)$$

Dengan u_g adalah gerakan perpindahan tanah.

Persamaan gerak dapat dituliskan dengan mudah dengan prinsip d'Alambert, yaitu :

$$(m + m_b)\ddot{u}_b + m\dot{u}_s + c_b v_b + k_b v_b = -(m + m_b)\ddot{u}_g \quad (2-3)$$

$$m\ddot{u}_b + m\ddot{u}_s + c_b v_b + k_b v_b = -m\ddot{u}_g \quad (2-4)$$

Dengan $M = m + m_b$, maka rasio massa γ bisa dituliskan :

$$\gamma = \frac{m}{m+m_b} = \frac{m}{M} \quad (2-5)$$

Frekuensi nominal

$$\omega_b^2 = \frac{k_b}{M} \qquad \omega_s^2 = \frac{k_s}{M} \qquad (2-6)$$

Rasio frekuensi

$$\epsilon = \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2} = O(10^{-2}) \qquad (2-7)$$

Rasio redaman

$$\beta_b = \frac{c_b}{\omega_b M} \qquad \beta_s = \frac{c_s}{\omega_s m} \qquad (2-8)$$

Dengan ini, persamaan 2-3 dan 2-4 akan menjadi

$$\gamma \ddot{u}_s + \ddot{u}_b + 2\omega_b \beta_b \dot{u}_b + \omega_b^2 v b = -\ddot{u}_g \qquad (2-9)$$

$$\ddot{u}_s + \ddot{u}_b + 2\omega_s \beta_s \dot{u}_s + \omega_s^2 v s = -\ddot{u}_g \qquad (2-10)$$

Persamaan karakteristik frekuensi

$$(1 - \gamma)\omega^4 - (\omega_b^2 + \omega_s^2)\omega^2 + \omega_b^2 \omega_s^2 = 0 \qquad (2-11)$$

Solusi untuk persamaan diatas adalah

$$\omega_1^2 = \omega_b^2 (1 - \gamma\epsilon) \qquad \omega_2^2 = \frac{\omega_s^2}{1 - \gamma} (1 + \gamma\epsilon) \qquad (2-12)$$

Kemudian untuk *mode shapes*

$$\phi^{1T} = (1, \epsilon) \qquad \phi^{2T} = \{1, -\frac{1}{\gamma}[1 - (1 - \gamma)\epsilon]\} \qquad (2-13)$$

Perpindahan asli dalam koordinat modal bisa dituliskan dengan

$$v_b = q_1 \phi_b^1 + q_2 \phi_b^2 \qquad (2-14)$$

$$v_s = q_1 \phi_s^1 + q_2 \phi_s^2 \qquad (2-15)$$

Dimana q_1, q_2 adalah koefisien modal yang bergantung pada waktu.

Sedangkan M_i, L_i dapat dinyatakan dengan

$$M_i = \phi^{iT} M \phi^i \qquad M_i L_i = \phi^{iT} M r \qquad (2-16)$$

Untuk urutan pertama pada ϵ ,

$$M_1 = M(1 + 2\gamma\epsilon) \quad (2-17)$$

$$M_2 = M \frac{(1-\gamma)[1-2(1-\gamma)\epsilon]}{\gamma} \quad (2-18)$$

And

$$L_1 = 1 - \gamma\epsilon \quad L_2 = \gamma\epsilon \quad (2-19)$$

Saat (v_b, v_s) pada persamaan (2-3) dan (2-3) diekspresikan dalam bentuk ϕ^1 dan ϕ^2 maka kita akan mendapatkan dua persamaan koefisien modal

$$q_{\cdot 1} + 2\omega_1\beta_1 q_{\cdot 1} + \lambda_1 q_{\cdot 2} + \omega_1^2 q_1 = -L_1 \ddot{u}_g \quad (2-20)$$

$$q_{\cdot 2} + 2\omega_2\beta_2 q_{\cdot 2} + \lambda_2 q_{\cdot 1} + \omega_2^2 q_2 = -L_2 \ddot{u}_g \quad (2-21)$$

Maka nilai β dapat dituliskan dalam bentuk berikut

$$\beta_1 = \beta_b \left(1 - \frac{3}{2}\gamma\epsilon\right) \quad (2-22)$$

$$\beta_2 = \frac{\beta_s + \gamma\beta_2\epsilon^{1/2}}{(1-\gamma)^{1/2}} \left(1 - \frac{\gamma\epsilon}{2}\right) \quad (2-23)$$

Jika rekaman waktu gerakan tanah $\ddot{u}_g(t)$ diketahui, nilai q pada persamaan (2-20) dan (2-21) dapat ditemukan dengan

$$q_1 = \frac{L_1}{\omega_1} \int_0^t \ddot{u}_g(t - \tau) e^{-\omega_1\beta_1\tau} \sin \omega_1\tau \, d\tau \quad (2-24)$$

$$q_2 = -\frac{L_2}{\omega_2} \int_0^t \ddot{u}_g(t - \tau) e^{-\omega_2\beta_2\tau} \sin \omega_2\tau \, d\tau \quad (2-25)$$

Dengan persamaan ini, nilai maksimal q dapat diestimasi dengan

$$|q_1|_{max} = L_1 S_D(\omega_1, \beta_1) \quad (2-26)$$

$$|q_2|_{max} = L_2 S_D(\omega_2, \beta_2) \quad (2-27)$$

Jika $S_d(\omega, \beta)$ adalah pseudo-displacement dan $S_s(\omega, \beta)$ adalah pseudo-acceleration, maka perpindahan modal maksimum dapat dihitung dengan prinsip SRSS,

$$\begin{aligned}
 v_{b,max} &= \sqrt{(\phi_1^1 |q_1|_{max})^2 + (\phi_1^2 |q_2|_{max})^2} \\
 v_{b,max} &= \sqrt{L_1^2 [S_d(\omega_1, \beta_1)]^2 + L_2^2 [S_d(\omega_2, \beta_2)]^2} \\
 v_{b,max} &= \sqrt{(1 - \gamma\epsilon)^2 [S_d(\omega_1, \beta_1)]^2 + \gamma^2 \epsilon^2 [S_d(\omega_2, \beta_2)]^2} \quad (2-28)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 |v_s|_{max} &= \sqrt{(\phi_2^1 |q_1|_{max})^2 + (\phi_2^2 |q_2|_{max})^2} \\
 v_{s,max} &= \epsilon \sqrt{(1 - \gamma\epsilon)^2 [S_d(\omega_1, \beta_1)]^2 + [1 - 2(1 - \gamma)\epsilon]^2 [S_d(\omega_2, \beta_2)]^2} \quad (2-29)
 \end{aligned}$$

Pada umumnya $\epsilon^2 S_D(\omega_1, \beta_2)$ dapat diabaikan dengan spektra gempa dimana perpindahan pada frekuensi tinggi jauh lebih kecil daripada frekuensi rendah. Maka

$$|v_b|_{max} = (1 - \gamma\epsilon) S_D(\omega_1, \beta_1) \quad (2-30)$$

Jika kita mengabaikan semua suku yang lebih tinggi dari ϵ^2 , maka estimasi nilai untuk

$$|v_s|_{max} = \epsilon \sqrt{S_D(\omega_1 \beta_1)^2 + S_D(\omega_2 \beta_2)^2} \quad (2-31)$$

Demikian pula, koefisien geser dapat dituliskan dengan

$$C_s = \left| \frac{k_s v_s}{m} \right|_{max} = \omega_s^2 |v_s|_{max} \quad (2-32)$$

$$C_s = \sqrt{[S_A(\omega_1, \beta_1)]^2 + [S_A(\omega_2, \beta_2)]^2} \quad (2-33)$$

Jadi jika kita hanya mempertahankan suku pertama, kita dapatkan

$$|v_b|_{max} = \frac{S_V}{\omega_b} = S_D(\omega_b, \beta_b) \quad (2-34)$$

$$|v_s|_{max} = \frac{\epsilon S_V}{\omega_b} = \epsilon S_D(\omega_b, \beta_b) \quad (2-35)$$

Dan desain koefisien geser didefinisikan dengan

$$C_s = \frac{k_s v_s}{m} = \omega_s^2 v_s$$

Menjadi

$$C_s = \omega_b S_V \left[1 + \epsilon^2 \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} \right]^{1/2}$$

$$C_s = S_A(\omega_b, \beta_b) \left(1 + \frac{\epsilon}{1-\gamma} \right)^{1/2}$$

$$C_s \approx S_A(\omega_b, \beta_b) \quad (2-36)$$

Hal ini menunjukkan bahwa untuk ϵ yang kecil dan spektrum desain yang khas, setidaknya pada tahap awal sistem isolasi akan dirancang untuk perpindahan dasar relatif $S_D(\omega_b, \beta_b)$ dan koefisien geser dasar untuk bangunan $S_A(\omega_b, \beta_b)$. Reduksi gaya geser pada dasar dibandingkan dengan struktur *fixed base*, di mana $C_s \approx S_A(\omega_b, \beta_b)$, untuk spektrum kecepatan konstan ω_b/ω_s atau kira-kira berorde $\epsilon^{1/2}$.

2.1.3. Persyaratan Umum

Sesuai SNI 1726:2019, terdapat beberapa persyaratan umum dalam menerapkan sistem ini pada bangunan.

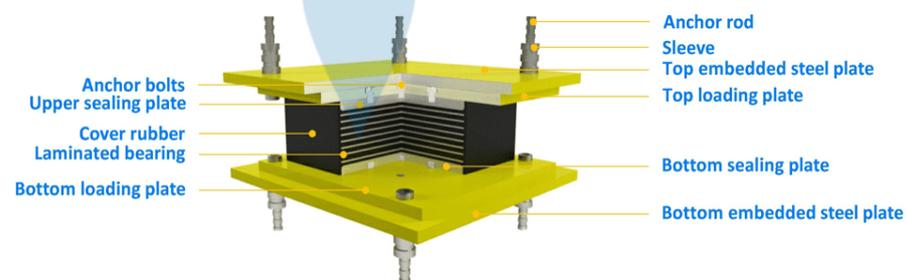
- a. Faktor keutamaan gempa harus diambil 1,0, tidak membedakan kategori risiko apapun yang diterapkan.
- b. Konfigurasi struktur harus ditetapkan memiliki ketidakberaturan apabila struktur memiliki ketidakberaturan horizontal Tipe 1b dan ketidakberaturan vertikal tipe 1a, 1b, 5a dan 5b seperti yang dijelaskan pada lampiran.

- c. Faktor redundansi harus diberikan pada struktur, kecuali untuk struktur yang tidak memiliki ketidakberaturan struktur, faktor redundansi diperbolehkan sama dengan 1,0.
- d. Dalam perencanaan harus mempertimbangkan kondisi lingkungan, pengaruh usia, rangkai, leleh, suhu operasional, pengaruh kelembaban, beban angin, ketahanan kebakaran, gaya pemulih lateral
- e. Jarak pemisahan minimum antara struktur dengan isolasi seismik dengan dinding penahan di sekeliling bangunan atau penghalang tetap lainnya tidak boleh kurang dari perpindahan maksimal total.

2.2. Tipe-tipe *Base Isolator*

Base Isolator terdiri dari banyak jenis sesuai kebutuhan dan jenis struktur masing-masing, pada umumnya base isolator memiliki prinsip yang sama yaitu menerima energi yang terjadi akibat gempa dengan melakukan perpindahan lateral sehingga energi tersebut tidak akan merambat hingga struktur atas. Namun tidak semuanya memerlukan tipe base isolator yang sama, sehingga terdapat beberapa jenis base isolator yang menyesuaikan syarat dan kebutuhan masing-masing pengguna.

2.2.1. *High Damping Rubber Bearing (HDRB)*



Gambar 2.3. Ilustrasi *High Damping Rubber Bearing*

Sumber: Hengshui JingTong Rubber Co., Ltd. (n.d).

Diakses melalui <https://www.bearing-pad.com/bearingpad/high-damping-rubber-bearing.html> ,17 November 2020

HDRB menggunakan jenis bantalan isolasi seismik berbahan karet yang dirancang secara khusus dengan kemampuan redaman tinggi, yang diapit oleh lapisan pelat baja untuk kekuatan. Saat terkena gaya lateral gempa bantalan karet redaman tinggi akan mengalami perpindahan lateral melalui deformasi geser karet, rasio redaman yang dapat di capai HDRB dapat mendekati 15%-18%.

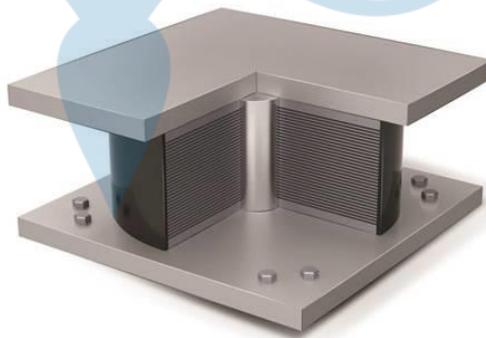


Gambar 2.4. *High Damping Rubber Bearing*

Sumber: Hengshui JingTong Rubber Co., Ltd. (n.d).

Diakses melalui <https://www.bearing-pad.com/bearingpad/high-damping-rubber-bearing.html> ,17 November 2020

2.2.2 *Lead Rubber Bearing (LRB)*



Gambar 2.5. Ilustrasi *Lead Rubber Bearing*

Sumber: Hengshui JingTong Rubber Co., Ltd. (n.d).

Diakses melalui <https://www.bearing-pad.com/bearingpad/lead-rubber-bearing.html> ,17 November 2020

Ciri utama yang membedakan LRB adalah komponen utamanya merupakan bantalan karet berlapis yang berinti timbal. Pada bagian pusat LRB terdapat timah yang menjadi tulang utama LRB dalam menahan beban bangunan, gaya lateral dan juga menyerap energi melalui deformasi plastis dari redaman histeresis. Redaman hysteresis merupakan sebuah sistem yang mendisipasi energi melalui deformasi material, deformasi material yang dimaksud disini merupakan deformasi LRB setelah terkena gaya gempa.

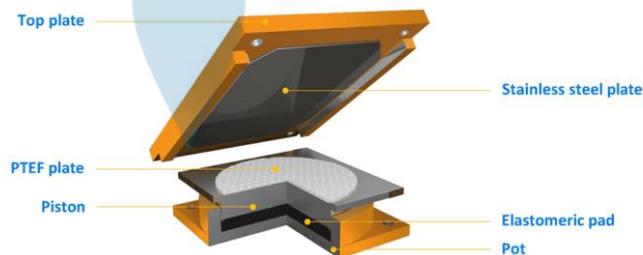


Gambar 2.6 *Lead Rubber Bearing*

Sumber: Hengshui JingTong Rubber Co., Ltd. (n.d).

Diakses melalui <https://www.bearing-pad.com/bearingpad/lead-rubber-bearing.html> , 17 November 2020

2.2.3. *Pot Bearing*



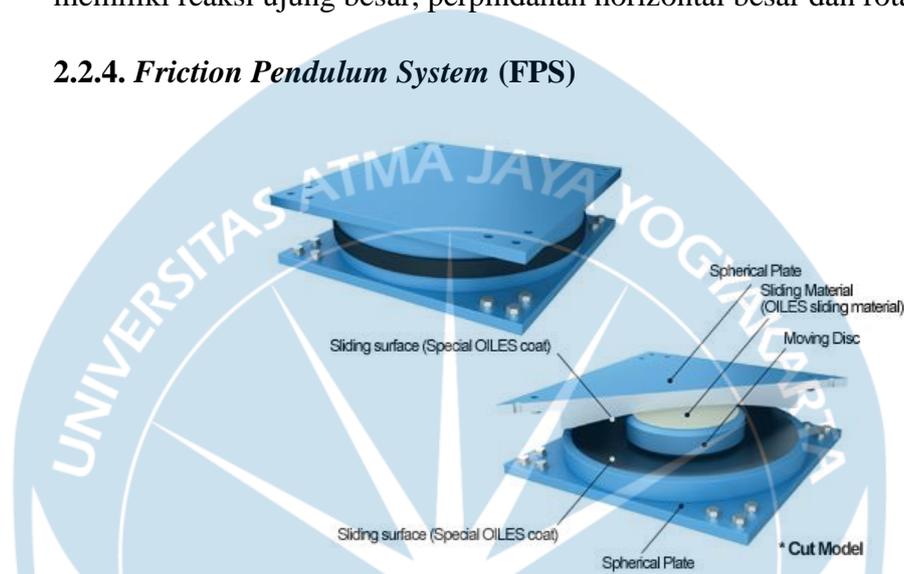
Gambar 2.7. Ilustrasi *Pot Bearing*

Sumber: Hengshui JingTong Rubber Co., Ltd. (n.d).

Diakses melalui <https://www.bearing-pad.com/bearingpad/pot-bearing.html> , 17 November 2020

Ciri utama dari *Pot Bearing* adalah ia mampu melakukan rotasi bantalan yang besar. Ketika terkena gaya gempa, pelat PTFE (Teflon) yang terletak pada piston dan pelat baja akan terjadi gerakan relatif sehingga perpindahan horizontal dapat terjadi. Pot bearing cocok untuk struktur yang memiliki reaksi ujung besar, perpindahan horizontal besar dan rotasi besar.

2.2.4. *Friction Pendulum System (FPS)*



Gambar 2.8. Ilustrasi *Friction Pendulum System*

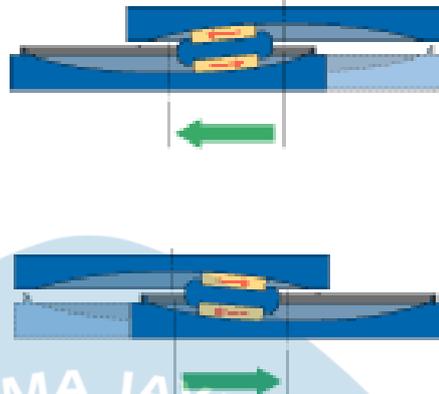
Sumber: OILES CORPORATION (n.d).

Diakses melalui:

<https://www.oiles.co.jp/en/menshin/building/menshin/products/fps/>

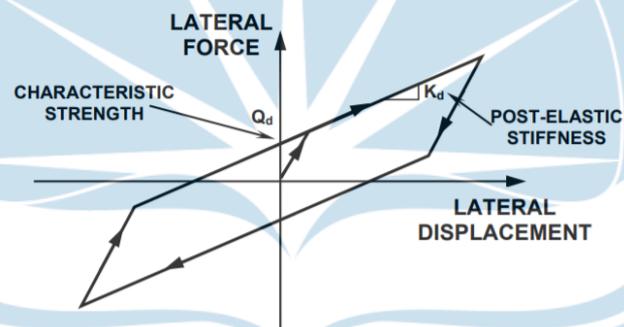
,17 November 2020

Friction Pendulum System menggunakan prinsip bandul. Pada saat FPS terkena gaya gempa, energi yang terjadi akan mendorong slider bergerak mengikuti permukaan lengkung pada FPS. Gesekan yang terjadi pada permukaan FPS juga mampu mendisipasi energi dari gaya gempa. Maka pada saat terjadi gempa, perpindahan horizontal pada FPS akan terjadi dan energi gempa juga berhasil teredam sehingga tidak akan merambat hingga struktur atas.



Gambar 2.9. Ilustrasi Konsep *Friction Pendulum System*
 Sumber: OILES CORPORATION (n.d). Diakses melalui
<https://www.oiles.co.jp/en/menshin/building/menshin/products/fps/> , 17
 November 2020

2.3. Properti *Base Isolator*



Gambar 2.10. Hubungan ideal gaya dan perpindahan isolasi seismik
 (Constantinou dkk.,2007)

Dalam merencanakan base isolator yang akan digunakan, terdapat beberapa properti dasar untuk base isolator berbahan karet yang perlu diketahui dalam perencanaan.

- a) Kekakuan efektif (k_M)

$$k_M = \frac{\sum |F_M^+| + \sum |F_M^-|}{2D_M} \quad (2-37)$$

Keterangan:

$\sum |F_M^+|$ = jumlah nilai absolut dari semua unit isolasi pada perpindahan positif sama dengan perpindahan maksimal

$\sum |F_M^-|$ = jumlah nilai absolut dari semua unit isolasi pada perpindahan negatif sama dengan perpindahan maksimal

D_M = perpindahan maksimum

b) Redaman efektif (β_M)

$$\beta_M = \frac{\sum E_M}{2\pi k_M D_M^2} \quad (2-38)$$

Keterangan :

$\sum E_M$ = energi terdipasi total (kN-m) pada sistem isolasi selama respons satu siklus pada perpindahan maksimal

c) Perpindahan Maksimal (D_M) adalah perpindahan maksimal yang akan terjadi pada base isolator saat menahan gaya lateral.

$$D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4\pi^2 B_M} \quad (2-39)$$

Keterangan :

g = percepatan gravitasi

S_{M1} = parameter percepatan spektral gempa maksimum yang dipertimbangkan dengan redaman 5% pada perioda 1 detik dengan satuan g

T_M = perioda efektif struktur pada perpindahan maksimum

B_M = koefisien numerik berdasar pada redaman efektif pada perpindahan maksimum

Tabel 2.1. Faktor redaman, B_M (SNI 1726:2019)

Redaman efektif (β_M)	Faktor B_M
≤ 2	0,8
5	1,0
10	1,2
20	1,5
30	1,7
40	1,9
≥ 50	2,0

d) Periode efektif pada saat perpindahan maksimal (T_M)

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{M \min} g}} \quad (2-40)$$

Keterangan :

W = berat seismik struktur atas

$k_{M \min}$ = kekakuan efektif minimum (kN/mm) pada perpindahan lateral rencana

g = percepatan gravitasi

Kemudian juga terdapat 2 properti mekanik lead rubber bearing yang diperlukan dalam perencanaan.

a) Characteristic Strength (Q_d) adalah kekuatan base isolator pada kondisi awal (belum mengalami perpindahan).

$$Q_d = A_L \sigma_L \quad (2-41)$$

Keterangan :

A_L = luas penampang inti timbal lead rubber bearing

σ_L = kekuatan luluh efektif

b) Post Elastic Stiffness (K_2) adalah kekakuan pada base isolator setelah mengalami pergeseran.

$$K_2 = f_L \frac{GA_r}{T_r} \quad (2-42)$$

Keterangan :

G = modulus geser karet

A_r = luas penampang karet

T_r = total ketebalan karet

f_L = parameter pengaruh inti timbal terhadap K_2 (antara 1,0 – 1,2)

2.4. Faktor modifikasi properti (λ)

Faktor modifikasi terbagi dua, maksimum dan minimum. Faktor ini digunakan untuk menghitung variasi dari parameter-parameter dari base isolator terhadap pengaruh lingkungan. Faktor modifikasi properti dapat ditentukan sesuai persamaan berikut

$$\lambda_{max} = \{1 + (0,75 \times (\lambda_{(ae,max)} - 1))\} \times \lambda_{(test,max)} \times \lambda_{(spec,max)} \geq 1,8 \quad (2-43)$$

$$\lambda_{min} = \{1 - (0,75 \times (1 - \lambda_{(ae,min)}))\} \times \lambda_{(test,min)} \times \lambda_{(spec,min)} \geq 0,6 \quad (2-44)$$

Keterangan :

$\lambda_{(ae)}$ = faktor modifikasi properti untuk memperhitungkan pengaruh usia dan kondisi lingkungan sekitar

$\lambda_{(test)}$ = faktor modifikasi properti untuk memperhitungkan pengaruh pemanasan, laju pembebanan dan *scragging*.

$\lambda_{(min)}$ = faktor modifikasi properti untuk memperhitungkan variasi manufaktur dari properti rata-rata base isolator dengan ukuran yang sama