



Alternatif Desain Struktur Gedung Monumen dan Museum Reog Ponorogo Dengan Friction Pendulum System

Hanisya Indah Mustika Hari^{1*}, Ketut Aswatama Wiswamitra², Erno Widayanto³, Krisnamurti⁴,
Dwi Nurtanto⁵

^{1,2,2,3,4,5} Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Indonesia

Jl. Kalimantan Tegalboto no. 37, Krajan Timur, Sumbersari, Kec. Sumbersari, Kabupaten Jember, Jawa Timur

E-mail*: hanisyaimhari@gmail.com

ABSTRACT

Ponorogo Regency, located on the southern coast of Java and bordering Pacitan Regency to the south, experiences frequent earthquakes due to its proximity to an active zone of interplate subduction. This activity causes the Eurasian Plate to be pushed northward by the Indo-Australian Plate at a rate of 50 to 70 mm/year, increasing the earthquake risk in the region. This research emphasizes the development of FPS base isolation systems as an effective solution to mitigate earthquake impacts. FPS was chosen for its ability to reduce earthquake forces, structural damage, and top drift, better than other isolation technologies such as LRB and HDRB, especially during near-fault earthquakes. The main intention of the study is to compare the structural behavior of the Reog Ponorogo Monument and Museum, which currently uses the SRPMK+SDSK dual system, with an alternative structure of the SRPMK+FPS base isolator. This alternative structure replaces shear walls with customized columns and beams with the same floor dimensions. Analysis using the spectrum response method with the ETABS program showed that the period of the alternative structure increased by 2.47 times (x direction) and 2.17 times (y direction) compared to the existing structure. In addition, the shear force of the alternative structure was reduced by 46.79% compared to the existing structure, while the inter-story deviation decreased significantly, averaging 51.52% (x direction) and 40.76% (y direction). The FPS specification used is FIP-D M 1750/800 (3700), confirming its effectiveness in improving structural resistance to earthquakes in a vulnerable region such as Ponorogo.

Keywords : Base Isolator System, Friction Pendulum System, Response Spectrum.

ABSTRAK

Kabupaten Ponorogo, yang terletak di pantai selatan Jawa dan berbatasan dengan Kabupaten Pacitan di selatan, sering mengalami gempa bumi karena berada dekat dengan zona aktif subduksi antar lempeng, ialah Lempeng Eurasia didorong ke utara oleh Lempeng Indo-Australia dengan kecepatan 50 hingga 70 mm/tahun. Hal tersebut dapat meningkatkan risiko gempa di wilayah Ponorogo. Penelitian ini menekankan pengembangan sistem isolasi dasar FPS sebagai solusi efektif untuk mengurangi dampak gempa. FPS dipilih karena kemampuannya dalam mengurangi gaya gempa, kerusakan struktural, dan *top drift*. Selain itu, FPS dinilai lebih baik dibandingkan dengan LRB dan HDRB, terutama saat terjadi gempa dekat. Tujuan utama penelitian adalah membandingkan perilaku struktur Monumen dan Museum Reog Ponorogo yang saat ini memanfaatkan sistem ganda SRPMK+SDSK dengan struktur alternatif SRPMK+isolator dasar FPS. Struktur alternatif ini mengganti dinding geser dengan kolom dan balok yang disesuaikan dengan dimensi lantai yang sama. Analisis memanfaatkan metode respons spektrum dengan program ETABS yang memperlihatkan hasil bahwa periode struktur alternatif meningkat 2,47 kali lipat (arah x) dan 2,17 kali lipat (arah y) dibandingkan dengan struktur eksisting. Selain itu, gaya geser struktur alternatif berkurang 46,79% dibandingkan dengan struktur eksisting, sementara simpangan antar lantai menurun secara signifikan, rata-rata 51,52% (arah x) dan 40,76% (arah y). Spesifikasi FPS yang dipergunakan adalah FIP-D M 1750/800 (3700), menegaskan efektivitasnya dalam meningkatkan ketahanan struktural terhadap gempa di wilayah rawan seperti Ponorogo.

Kata Kunci : Sistem Isolasi Dasar, Friction Pendulum System, Respons Spektrum.

Naskah diterima 29 Juli 2024; Revisi 09 Januari 2025; Diterima 24 Februari 2025. Tanggal Publikasi 01 Maret 2025

Jurnal teknika berada pada lisensi *Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License*

DOI: [10.30736/jt.v17i1.1285](https://doi.org/10.30736/jt.v17i1.1285), Hal 13 -20



1. PENDAHULUAN

Wilayah Kabupaten Ponorogo dikenal sebagai wilayah yang tercatat cukup sering terjadi bencana gempa bumi. Wilayah ini berdekatan dengan daerah pesisir pantai selatan dan berbatasan dengan Kabupaten Pacitan di Selatan, Kabupaten Wonogiri di Barat Daya, dan Kabupaten Wonogiri di Timur Tenggara (Sary, 2022). Wilayah pesisir pantai selatan Jawa menyimpan tingkat risiko tinggi terhadap gempa bumi karena dekat dengan episenter aktivitas subduksi antar lempeng yang mana Lempeng Eurasia ditumbuk ke arah utara oleh Lempeng Indo-Australia dengan kecepatan 50 hingga 70 mm/tahun (Suryawidodo dkk., 2023). Maka dari itu, Kabupaten Ponorogo perlu mengambil langkah-langkah dalam mengatasi risiko tersebut melalui pembangunan infrastruktur yang menyimpan konsep tahan gempa.

Objek penelitian yang akan diadakan adalah Monumen dan Museum Reog Ponorogo yang bertempat di Gunung Gamping Kecamatan Sampung, Kabupaten Ponorogo. Bangunan ini menyimpan 26 lantai dengan ketinggian 120 meter. Pembangunan Monumen dan Museum Reog Ponorogo ini memanfaatkan *shear wall* atau dinding geser sebagai memperkuat struktur terhadap gempa atau memanfaatkan sistem rangka pemikul momen. Namun, penggunaan dinding geser dapat menimbulkan dampak pada komponen non-struktural (Arifin dkk., 2019). Hal ini berpotensi mengurangi periode alami getaran struktur, yang dapat memicu kerusakan yang signifikan pada bangunan. Upaya untuk mengurangi risiko ini mencakup pendekatan alternatif yang lebih baik dalam meredam gaya gempa lantaran bangunan tidak membahayakan lingkungan sekitarnya (Syarif, 2020).

Seiring berkembangnya waktu dan teknologi, terdapat perkembangan elemen yang efektif untuk mengurangi gaya gempa, ialah dengan *base isolation system* atau sistem isolasi dasar. Sistem isolasi dasar adalah sebuah sistem yang bersifat fleksibel dimana kekakuan bangunan diisolasi dari pondasi di atas tanah, lantaran bisa meminimalisir transfer getaran dari gempa ke bangunan di atasnya. Sistem isolasi dasar juga dapat membantu mengurangi gaya gempa pada pondasi dengan membiarkannya bergerak dan meredam energi gempa. Dengan adanya sistem isolasi dasar, bagian atas bangunan tetap kuat dan tidak rusak, terutama pada bangunan bertingkat rendah hingga menengah (Liu dkk., 2014).

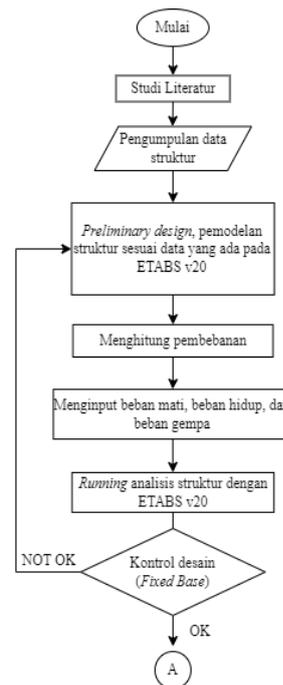
Secara umum, ada beberapa jenis *base isolator*, ialah *Laminated Rubber (Elastometric) Bearing*, *Lead Rubber Bearing (LRB)*, *High Damping Rubber Bearing (HDRB)*, dan *Friction Pendulum System (FPS)*. *Base isolator* tipe FPS menyimpan spesifikasi yang paling efektif untuk mengurangi gaya gempa, dengan tingkat kerusakan dan *top drift* yang lebih rendah dibandingkan dengan LRB dan HDRB, terutama dalam situasi gempa dekat. FPS adalah sebuah sistem isolator yang menyatukan dua kerangka pokok, ialah gesekan baja yang terpisah oleh lapisan teflon dan gerakan pendulum di atas

permukaan lengkung. FPS menyimpan keunggulan dalam stabilitas dan ketahanan yang kuat (Habieb dkk., 2019).

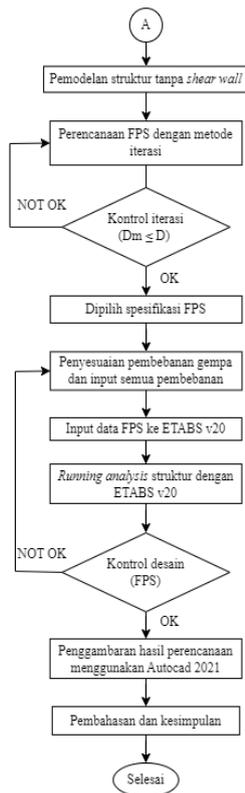
Dalam penelitian ini, akan diadakan pemodelan struktur alternatif Monumen dan Museum Reog Ponorogo dengan *Friction Pendulum System (FPS)*. FPS memanfaatkan konsep dimana struktur di atasnya dipisahkan dari pondasi memanfaatkan bantalan yang menyimpan permukaan cekung. Permukaan ini menyebabkan sewaktu-waktu struktur untuk bergerak atau bergoyang searah dengan periode alaminya sendiri ketika terjadi gempa (Suryawidodo dkk., 2023). Pemodelan struktur alternatif yang diadakan adalah dengan mengubah perletakan struktur dari kondisi eksisting yang memanfaatkan dinding geser menjadi FPS kemudian dibandingkan yang diharapkan hasil gempa rencana yang diterima menjadi lebih kecil lantaran tidak terjadi kerusakan pada struktur bangunannya.

2. METODE

Lokasi penelitian berada di proyek pembangunan Monumen dan Museum Reog Ponorogo yang terletak di Gunung Gamping Kecamatan Sampung, Kabupaten Ponorogo, Jawa Timur. Pemilik proyek ini adalah Pemerintah Kabupaten Ponorogo melalui Dinas Kebudayaan, Pariwisata, Pemuda, dan Olahraga Pemerintahan Kabupaten Ponorogo yang dibangun untuk mengembangkan pembangunan pariwisata nasional. Selain itu, bangunan ini direncanakan memiliki ketinggian 120 meter dengan lantai dasar sampai dengan lantai 14 difungsikan sebagai museum dan di atasnya digunakan sebagai monumen yang berbentuk patung Reog Ponorogo yang disertai *shear wall* sebagai memperkuat strukturnya terhadap adanya gempa.



Gambar 1. Flowchart



Gambar 2. Lanjutan

Penelitian ini memanfaatkan metode elemen hingga dengan bantuan *software* ETABS v20. Berikut ini tahapan analisisnya.

a. Studi literatur

Studi literatur yang dipergunakan bersumber dari beberapa artikel yang berhubungan dengan FPS. Acuan yang dipergunakan adalah SNI 1726:2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung, SNI 1727-2020 tentang Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain, SNI 2847:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung, Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung (PPIUG) Tahun 1983, dan *Base Isolation of Structure: Design Guidelines* oleh Trevor E. Kelly, S.E.

b. Pengumpulan data struktur

Data-data dan informasi mengenai proyek pembangunan Monumen dan Museum Reog Ponorogo yang dikumpulkan untuk diteliti terseleksi menjadi 2 bagian, ialah data primer dan data sekunder. Adapun data primer yang berupa observasi dan wawancara dengan pihak perencana yang bersangkutan. Sedangkan data sekunder yang didapatkan adalah berupa laporan perencana dan *Detail Engineering Design* (DED) dari struktur gedung.

c. *Preliminary design* dan pemodelan struktur pada ETABS v20

Preliminary design diadakan dengan seperti biasanya, ialah menginput dimensi struktur

sekunder searah dengan data yang disediakan oleh perusahaan terkait.

d. Pembebanan struktur

Beban-beban yang berupa beban mati, beban hidup, dan beban gempa dimasukkan sebagai input ke dalam ETABS v20 secara satu per satu yang selanjutnya akan dianalisis terhadap struktur bangunan.

e. Data teknis

- Lokasi bangunan : Ponorogo
- Fungsi bangunan : Gedung museum
- Konstruksi bangunan : Beton bertulang
- Tinggi total gedung : 120 meter
- Jumlah lantai : 26 lantai
- Jenis tanah : batuan
- Mutu beton (f_c') : 30 MPa
- Mutu baja tulangan (f_y) : 280 MPa (polos) dan 420 MPa (ulir)

f. Pemodelan FPS

Dimensi dari FPS ditentukan pada tahap awal desain yang dikenal sebagai *preliminary design*. Tujuan dari tahap ini adalah untuk menemukan isolator yang menyimpan ukuran jari-jari kelengkungan yang efektif, kapasitas beban vertikal, dan koefisien gesek tertentu. Parameter yang dijadikan acuan untuk mengatur isolator meliputi *friction model*, jari-jari kelengkungan yang efektif, dan kekakuan elastis awal. *Friction model* yang dipergunakan adalah "Hukum Gesek Coloumb" searah dengan paduan dari katalog FIP Industriale. Untuk memperoleh dimensi FPS yang akurat, proses iterasi mesti diadakan hingga perbedaan antara asumsi dan hasil perhitungan menjadi sangat kecil.

3. PEMBAHASAN

Struktur yang diterapkan pada bangunan Monumen dan Museum Reog Ponorogo menggunakan sistem dinding geser (shear wall), yang berfungsi untuk meningkatkan kekakuan dan ketahanan bangunan terhadap beban lateral seperti gempa dan angin. Penggunaan shear wall umum diterapkan pada bangunan bertingkat tinggi karena kemampuannya dalam menahan gaya geser serta meningkatkan stabilitas struktur. Dengan adanya sistem ini, distribusi beban dapat lebih merata sehingga meminimalkan deformasi berlebihan pada bangunan.

Dalam tahap awal analisis struktur, dilakukan proses pemodelan menggunakan perangkat lunak bantu untuk memastikan desain memenuhi standar keamanan dan kekuatan yang ditetapkan. Penelitian ini menggunakan ETABS v20 sebagai perangkat utama dalam pemodelan struktur bangunan. Bangunan Monumen dan Museum Reog Ponorogo dirancang dengan ketinggian mencapai 120 meter dan terdiri dari 26 lantai. Melalui pemodelan ini, berbagai parameter struktural dapat dianalisis secara mendetail untuk mengevaluasi performa bangunan terhadap beban yang bekerja.

Tabel 1. Beban mati pada kolom yang ditinjau

No.	Beban	Berat	A Section (m ²)	Panjang (m)	Lebar (m)	Jumlah Lantai	Berat Total (kg)
1	Pada pelat	100	-	5	5	13	32500
2	Balok gedung	2400	0,15	5	5	13	32400
3	Pelat	2400	0,15	5	5	13	117000
4	K1	2400	1	5	-	16	192000
5	K2	2400	0,36	5	-	7	30240
6	Patung	170	-	-	-	13	2210
7	Balok patung	2400	0,15	5	-	13	23400
Total							406350

Tabel 2. Beban hidup pada kolom yang ditinjau

No.	Beban	Berat	A Section (m ²)	Panjang (m)	Lebar (m)	Jumlah Lantai	Berat Total (kg)
1	Pada pelat	488,4	-	5	5	13	158730

Beban gempa yang direncanakan menganut pada SNI 1726:2019 dengan data yang dipergunakan adalah data yang ada di dalam buku laporan struktur proyek ini. Analisis gempa pada pemodelan ini memanfaatkan metode respons spektrum. Berikut adalah data yang akan dimasukkan dalam pemodelan ETABS.

Tabel 3. Data analisis gempa dalam pengaturan *modify lateral load* pada ETABS

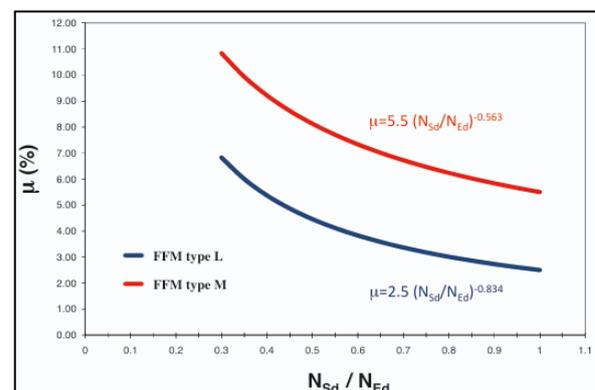
No.	Keterangan	Nilai	Sumber
1	SS	0,8997	Laporan struktur
2	S1	0,4207	Laporan struktur
3	Long-Period Transition Period	8	Laporan struktur
4	Site Class	C	Laporan struktur
5	Fa	1,2	SNI 1726:2019 tabel 6
6	Fv	1,5	SNI 1726:2019 tabel 7
7	SDS	0,7198	SNI 1726:2019 pasal 6.2 dan 6.3
8	SD1	0,4207	SNI 1726:2019 pasal 6.2 dan 6.3
9	R	7	SNI 1726:2019 tabel 12
10	Ω	2,5	SNI 1726:2019 tabel 12
11	Cd	5	SNI 1726:2019 tabel 12
12	I	1,5	SNI 1726:2019 tabel 3 dan 4
13	Ct (ft), x	0,2; 0,75	SNI 1726:2019 tabel 18

Struktur alternatif yang dipergunakan pada pemodelan bangunan Monumen dan Museum Reog Ponorogo adalah memanfaatkan base isolator tipe FPS. Perbedaan pemodelan struktur alternatif dengan struktur eksisting adalah tidak adanya *shear wall* atau dinding geser yang digantikan oleh kolom dan balok yang dimensinya disesuaikan dengan kolom dan balok lainnya pada lantai yang sama. Perencanaan struktur yang memanfaatkan *base isolator* mesti searah dengan ketentuan yang tercantum dalam SNI 1726:2019 pasal 12. Analisis struktur akan memanfaatkan metode respons spektrum, seperti yang ditata dalam SNI 1726:2019 pasal 12.4.2. Langkah awal dalam perencanaan FPS melibatkan perhitungan beban pada setiap titik kolom berlandaskan analisis dari pemodelan struktur yang ada. Untuk memformulasi perilaku permukaan geser

yang melengkung akibat gempa, dipergunakan beban rata-rata yang bekerja pada isolator selama gempa berlangsung. Data analisis diperoleh dari perhitungan memanfaatkan ETABS dengan kombinasi pembebanan terbesar, ialah 1,2D+L+E.

Pada pemodelan struktur alternatif ini, *base isolator* memanfaatkan produk dari FIP Industriale. Langkah awal dalam perencanaan FPS adalah menetapkan *displacement* yang direncanakan (D) dengan pendekatan iteratif untuk membandingkannya dengan *displacement* maksimum (D_M) yang dapat terjadi akibat gempa. *Displacement* maksimum mesti lebih kecil daripada *displacement* rencana yang ditentukan dalam spesifikasi FPS yang tercantum dalam brosur FIP Industriale (D_M ≤ D). Iterasi mesti diadakan hingga perbedaan antara *displacement* yang didesain dan yang berlangsung sangat kecil. Rencana spesifikasi FPS yang dipergunakan dalam perencanaan ini diperoleh dari brosur spesifikasi *curved surface sliders* dari FIP Industriale.

Koefisien gesek (μ) bervariasi berlandaskan beban vertikal dan merupakan parameter krusial dalam pemodelan struktur yang memanfaatkan permukaan lengkung, terutama pada FPS.



Gambar 3. Grafik koefisien gesek FPS

Gaya horizontal maksimum adalah hasil dari total gaya gesek dan gaya pemulihan restoratif yang timbul akibat permukaan yang lengkung.

Nilai F_{max} tidak boleh kurang dari gaya geser yang berlangsung pada arah x dan y akibat gempa yang dianalisis dalam struktur ETABS.

$$F_0 = \mu N_{sd} \quad (1)$$

$$K_r = \frac{N_{sd}}{R} \quad (2)$$

$$F_{max} = F_0 + K_r \cdot d \quad (3)$$

Persamaan kekakuan efektif (K_e) dan redaman *viscous* efektif (ζ_e) adalah berikut.

$$K_e = N_{sd} \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{d} \right) \quad (4)$$

$$\zeta_e = \frac{2}{\pi} \frac{1}{\frac{d}{\mu R} + 1} \quad (5)$$

Nilai K_e dan ζ_e bergantung pada besar perpindahan. Saat memformulasi sistem isolasi sebagai model linear yang setara, proses iterasi mesti diadakan lagi hingga perbedaan antara perpindahan yang didesain dan yang berlangsung sangat minimal.

Periode fundamental efektif dapat dikalkulasi dengan persamaan berikut.

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{d} \right)}} \quad (6)$$

Kekakuan efektif maksimum (K_{Mmax}) merupakan kekakuan pada kondisi perpindahan maksimum. Berikut adalah persamaan K_{Mmax} .

$$K_{Mmax} = \frac{1,1 \cdot K_{Mmin}}{0,9} \quad (7)$$

Semua komponen struktural, termasuk sistem isolasi dan pondasi di bawahnya, mesti didesain dan dikonstruksikan untuk menahan gaya lateral gempa minimum (V_b), searah dengan persyaratan yang ditata dalam SNI 1726:2019 pasal 12.5.4.1.

$$V_b = K_M \cdot D_M \quad (8)$$

Struktur yang berada di atas sistem isolasi mesti didesain dan dikonstruksikan untuk mampu menanggung gaya geser minimum (V_s), searah dengan ketentuan yang ditemukan dalam pasal 12.5.4.2 dari SNI 1726:2019.

$$V_{st} = V_b \left(\frac{W_s}{W} \right)^{(1-2,5\beta_m)} \quad (9)$$

$$V_s = \frac{V_{st}}{R_1} \quad (10)$$

Nilai B_M bergantung pada besarnya presentase redaman. Untuk mendapatkan nilai B_M , perlu diadakan interpolasi dengan data yang ada di Tabel 36 SNI 1726:2019.

$$B_M = \frac{\zeta_e - \beta_1}{\beta_2 - \beta_1} \times (B_{M2} - B_{M1}) + B_{M1} \quad (11)$$

Menurut ketentuan SNI 1726:2019 pasal 12.4.1, T_M adalah periode efektif dari struktur yang memanfaatkan isolasi seismik, yang diukur pada perpindahan maksimum dalam arah yang sedang dianalisis.

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_e \cdot g}} \quad (12)$$

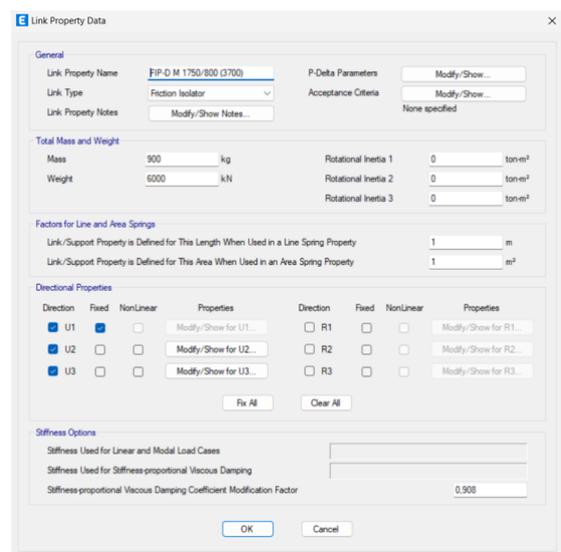
Perpindahan maksimum (D_M) adalah nilai yang paling menjamin untuk memilih spesifikasi FPS yang persamaannya adalah sebagai berikut.

$$D_M = \frac{g \cdot S_{M1} \cdot T_M}{4\pi^2 \cdot B_M} \quad (13)$$

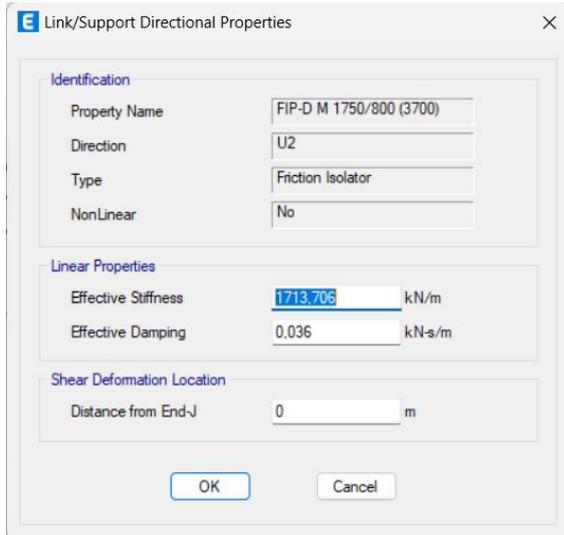
Setelah melakukan metode iterasi, didapatkan spesifikasi FIP-D M 1750/800 (3700) dari *curved survice sliders* yang menganut pada brosur FIP Industriale.

Untuk analisis struktur dengan *base isolator*, dimana awalnya memanfaatkan beban respons spektrum gempa dengan redaman 5%, perlu dikurangi dengan faktor koefisien redaman efektif (B_M). Dalam pemodelan alternatif ini, nilai B_M disesuaikan dengan redaman efektif yang sudah dikalkulasi sebelumnya. Pendekatan ini mengikuti pedoman AASHTO yang mengharuskan konversi nilai redaman efektif menjadi periode struktur. Untuk $T > B_M$, $S_a \text{ isolation} = \frac{S_a}{B_M}$.

Pada pemodelan struktur eksisting yang memanfaatkan perletakan jepit diubah menjadi *base isolator* tipe FPS pada pemodelan struktur alternatif ini. Pemodelan *base isolator* akan memanfaatkan fitur *link* pada ETABS. Langkah awal dalam pemodelan adalah menjamin perletakan FPS dengan mengakses menu *link/support properties*, kemudian memilih *section properties*. Masukkan data yang sudah dikalkulasi dari spesifikasi FPS ke dalamnya. Pilih *friction isolator* pada *link type*, centang arah U1, U2, U3, dan pilih *fixed* pada arah U1. Analisis ini memanfaatkan metode linear lantaran tidak perlu memilih opsi non-linear di setiap arah. Selanjutnya, pilih *modify/show for* U2 dan U3, dan masukkan data kekakuan efektif dan redaman efektif yang sudah dikalkulasi sebelumnya.

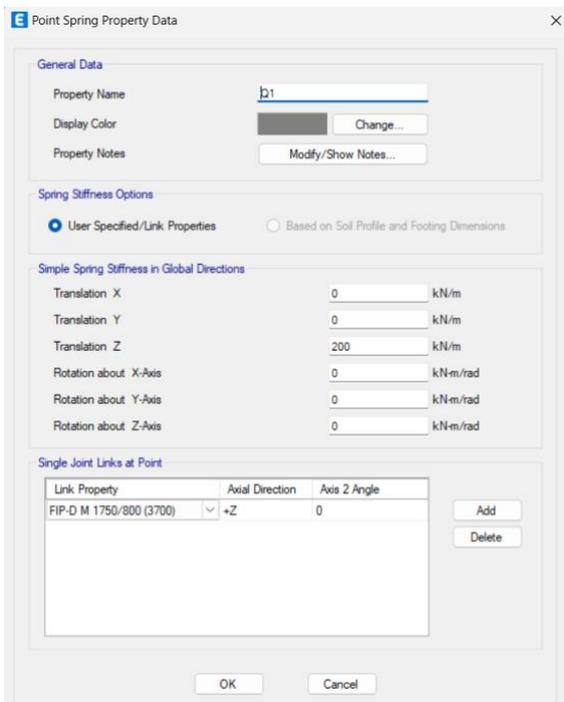


Gambar 4. Pengaturan *link property* FPS pada ETABS



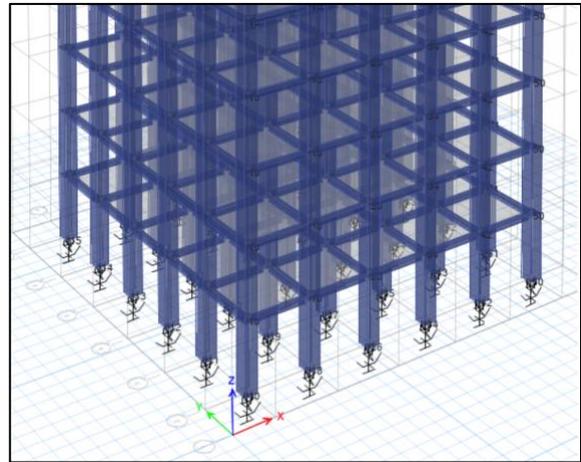
Gambar 5 . Pengaturan *link/support directional properties* U2 pada ETABS

Berbeda dengan program SAP2000 yang memungkinkan penggambaran *base isolator* secara langsung memanfaatkan *link*, program ETABS tidak menyediakan fitur tersebut. Dalam ETABS, penggambaran *base isolator* tidak dapat dilakukan secara langsung melalui *link*. Maka dari itu, diharuskan penggunaan *spring* untuk merepresentasikan *property* dari *link* yang sudah dimaknai, ialah Q1, dengan cara pilih *point spring* pada menu *spring properties*, lalu pilih *add new property*. Kemudian, input data *spring* dengan isi gaya horizontal pada isolator yang sudah dikalkulasi sebelumnya.



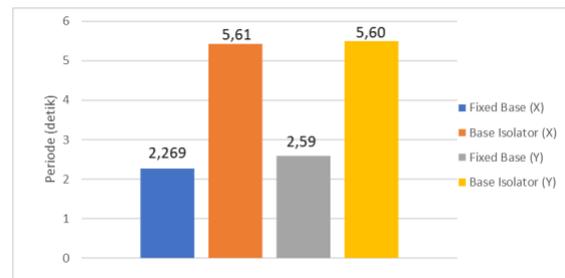
Gambar 6 . Pengaturan *spring* FPS pada ETABS

Setelah input data *spring*, assign data *spring* sebagai perletakan dengan cara pilih *joint* pada menu *assign*, lalu pilih *springs* dan klik semua *joint* untuk mengganti perletakan dari jepit ke *base isolator* tipe FPS.



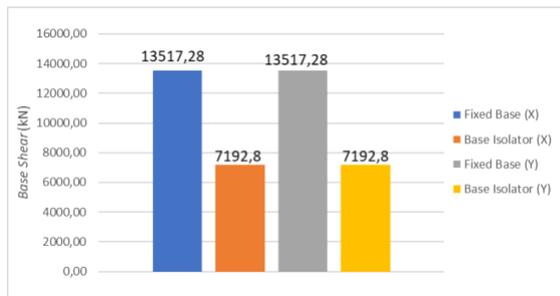
Gambar 7 . Tampilan FPS pada ETABS

Setelah diadakan analisis untuk struktur eksisting dan alternatif, selanjutnya adalah perbandingan perilaku dari keduanya.



Gambar 8 . Perbandingan Periode Struktur

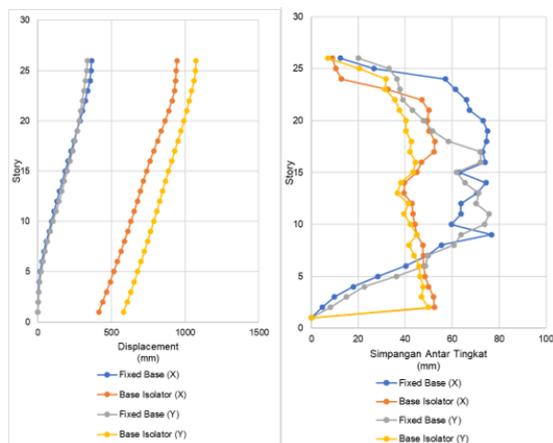
Grafik di atas memperlihatkan periode struktur pada struktur eksisting menyimpan periode yang lebih kecil daripada periode struktur pada struktur alternatif. Periode struktur alternatif mengalami peningkatan sebesar 2,47 kali lipat pada arah x dan 2,17 kali lipat pada arah y dari struktur eksisting. Hal ini dikarenakan kekakuan struktur pada struktur alternatif berkurang pada bagian dasar karena adanya *base isolator*. Periode struktur yang diisolasi menyimpan durasi yang lebih panjang karena fleksibilitas bangunan meningkat karena penggunaan *base isolator* yang memungkinkan dasar bangunan untuk bergerak secara horizontal ke arah x dan y untuk meredam getaran serta energi gempa. Peningkatan periode struktur pada struktur bangunan yang diisolasi ini dapat menjadi hal yang diharapkan karena dapat mengurangi dampak dari getaran gempa yang berlangsung.



Gambar 9. Perbandingan Gaya Geser

Grafik yang terlihat pada Gambar di atas memperlihatkan bahwa gaya geser dasar struktur alternatif lebih rendah dibandingkan dengan gaya geser pada struktur eksisting. Gaya geser pada *base isolator* untuk arah x dan y mengalami penurunan sebesar 46,79% dibandingkan dengan gaya geser pada *fixed base* untuk arah x dan y. Hal ini disebabkan oleh koefisien modifikasi respons spektrum pada *base isolator* yang lebih kecil dibandingkan dengan *fixed base*, yang memproduksi gaya gempa yang lebih besar. Nilai gaya geser dasar merupakan hasil penjumlahan dari gaya geser lateral pada semua lantai. Ketika nilai gaya geser rendah, gaya geser yang berlangsung pada setiap lantai juga menjadi rendah lantaran dapat meningkatkan rasio kapasitas struktur dalam menangani gaya geser. Dampaknya, beban yang diterima oleh struktur akan berkurang, mempengaruhi perpindahan, *story drift*, dan kinerja keseluruhan bangunan.

Nilai *displacement* didapatkan dari hasil *running analysis* program ETABS. Sedangkan, nilai *story drift* didapatkan dari hasil perhitungan manual sesuai yang diacu pada SNI 1726:2019 pasal 7.8.6. *Story drift* atau bisa disebut juga simpangan menyimpan dua jenis, ialah simpangan elastik dan inelastik. Simpangan elastik dapat dikalkulasi dengan mengurangi perpindahan lantai dengan lantai sebelumnya. Sementara itu, simpangan inelastik dapat dikalkulasi dengan mengalikan simpangan elastik dengan faktor pembesaran defleksi, kemudian hasilnya dibagi dengan faktor keutamaan gempa



Gambar 10. Perbandingan *displacement* dan simpangan antar lantai

Dari grafik yang ditampilkan Gambar di atas memperlihatkan bahwa struktur alternatif menyimpan *displacement* yang lebih besar karena adanya gerakan atau perpindahan pada lantai dasarnya yang dipengaruhi oleh *base isolator*. Dari hasil perbandingan simpangan antar lantai pada struktur eksisting dengan struktur alternatif, mampu disimpulkan bahwa struktur alternatif mampu mereduksi gaya gempa yang berlangsung yang mana menyimpan simpangan antar lantai dengan rata-rata sebesar 51,52% arah x dan 40,76% arah y daripada struktur eksisting. Hal ini dapat mengurangi kerusakan non struktural saat terjadi gempa

4. KESIMPULAN

Berlandaskan analisis yang sudah diadakan dalam membandingkan perilaku struktur eksisting dengan struktur alternatif pada Monumen dan Museum Reog Ponorogo, mampu disimpulkan sebagai berikut.

- 1) Perencanaan *Friction Pendulum System* pada struktur alternatif bangunan Monumen dan Museum Reog Ponorogo memanfaatkan metode analisis gempa respons spektrum dan dipilih spesifikasi FIP-D M 1750/800 (3700) dari *curved survice sliders* yang menganut pada brosur FIP Industriale.
- 2) Hasil dari perbandingan perilaku struktur eksisting dengan struktur alternatif adalah sebagai berikut.
 - a) Periode struktur alternatif memanfaatkan *Friction Pendulum System* mengalami peningkatan sebesar 2,47 kali lipat pada arah x dan 2,17 kali lipat pada arah y dari struktur eksisting memanfaatkan *shear wall*
 - b) Gaya geser struktur alternatif memanfaatkan *Friction Pendulum System* arah x dan y berkurang sebanyak 46,79% dibanding gaya geser struktur eksisting memanfaatkan *shear wall*.
 - c) Struktur alternatif memanfaatkan *Friction Pendulum System* mampu mereduksi gaya gempa yang berlangsung yang mana menyimpan simpangan antar lantai dengan rata-rata sebesar 51,52% arah x dan 40,76% arah y daripada struktur eksisting memanfaatkan *shear wall*.

PUSTAKA

- Agarwal, A., Chatterjee, S., Ram, S., Singh, D., Ralli, R., & Sharma, C. (2023). Effectiveness of friction pendulum system on the seismic behavior of high-rise building with shear wall. *Asian Journal of Civil Engineering*, 24(7), 2719–2726. <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00618-0>
- Arifin, M., Fransisca, L., & Sagara, A. (2019). Studi Perbandingan Gedung dengan Iregularitas Horizontal Memanfaatkan Base Isolation dan

- FixedBase. *Jurnal Manajemen Aset Infrastruktur & Fasilitas*, 3(2), 75–88.
- Calvi, P. M., & Calvi, G. M. (2018). Historical Development of Friction-Based Seismic Isolation Systems. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 106, 14–30. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.12.003>
- Habieb, A. B., Valente, M., & Milani, G. (2019). Effectiveness of different base isolation systems for seismic protection: Numerical insights into an existing masonry bell tower. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105752>
- Hamidi, A., Yasri, D., & Irsyel, A. R. (2023). Respon Spectrum pada Bangunan Gedung terhadap Kelas Situs Tanah. *JICE-Journal of Infrastructure and Civil Engineering*, 3(3), 150–162. <https://doi.org/10.35583/jice.v3i3.50>
- Kim, S.-W., Jeon, B.-G., Yun, D.-W., Jung, W.-Y., & Ju, B.-S. (2021). Seismic Experimental Assessment of Remote Terminal Unit System with Friction Pendulum under Triaxial Shake Table Tests. *Metals*, 11(9), 1428. <https://doi.org/10.3390/met11091428>
- Liu, T., Zordan, T., Briseghella, B., & Zhang, Q. (2014). Simplified Linear Static Analysis for Base-Isolated Buildings with Friction Pendulum Systems. *Structural Engineering International*, 24(4), 490–502. <https://doi.org/10.2749/101686614X13854694314405>
- Lousidis, A. P. (2015). Dynamic Analysis of a Friction Pendulum Isolation System (FPS) under earthquake excitation. Technical University of Crete.
- Muliadi, Afifuddin, M., & Aulia, T. B. (2014). Analisis Respon Bangunan Memanfaatkan Base Isolator Sebagai Pereduksi Beban Gempa di Wilayah Gempa Kuat. *Jurnal Teknik Sipil Pascasarjana Universitas Syiah Kuala*, 3(2), 109–118.
- Muliadi, & Ihsan, M. K. (2017). ANALISIS PERIODA BANGUNAN DINDING GESER DENGAN BASE ISOLATOR AKIBAT GAYA GEMPA. *Teras Jurnal*, 7(2), 263–273. <https://doi.org/10.29103/tj.v7i2.129>
- Sary, E. L. A. (2022). Penerapan Simulasi Mitigasi Bencana Gempa Bumi dalam Pembelajaran IPS di SMP Negeri 1 Balong Ponorogo. Institut Agama Islam Negeri Ponorogo.
- Simatupang, F. O., Kurniawan, R., & Haris, S. (2023). Analisis Struktur Beton Bertulang Tahan Gempa Untuk Berbagai Variasi Tinggi Bangunan. *Jurnal Talenta Sipil*, 6(2), 413–425. <https://doi.org/10.33087/talentasipil.v6i2.350>
- Suryawidodo, W., Affandhie, R. B. A., & Rahardjo, I. P. (2023). Alternatif Desain Struktur Gedung Rumah Sakit Universitas Islam Malang dengan Base Isolator Tipe Friction Pendulum System (FPS). *JURNAL TEKNIK ITS*, 12(1), 9–14.
- Syah, M. A., Ardhyana, M. Z., Fajri, H., Purwandito, M., & Irwansyah. (2023). Perbandingan Analisis Struktur Gedung Laboratorium PGSD Universitas Samudra Metode Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus Memanfaatkan ETABS dan BIM Tekla Struktural Designer. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Sipil*, 20(2), 210–219.
- Syarif, A. (2020). MODIFIKASI PERENCANAAN OFFICE TOWER OLIVE DENGAN BASE ISOLATOR TIPE FRICTION PENDULUM SYSTEM (FPS) DAN TERLETAK DI JAYAPURA. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.