

Alternatif Desain Struktur Gedung Rumah Sakit Universitas Islam Malang dengan Base Isolator Tipe Friction Pendulum System (FPS)

Wiku Suryawidodo, Raden Buyung Anugraha Affandhie, dan Ibnu Pudji Rahardjo
Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: r_buyung_aa@ce.its.ac.id

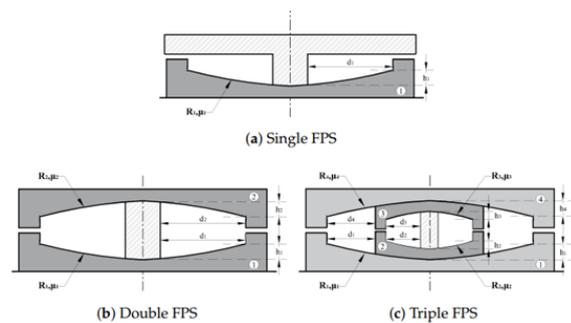
Abstrak—Malang daerah yang sering terjadi Gempa Bumi karena letaknya berada pada daerah subduksi lempeng. Kondisi tersebut mengakibatkan sering terjadi gempa ber-skala besar. Dilakukan perhitungan ulang bangunan RS Universitas Islam Malang pada kelas situs sedang (SD) dengan Sistem Rangka Dinding Geser Beton Biasa, Sistem Rangka Dinding Geser Beton Khusus, Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB) dan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Bahwa semua struktur tidak memenuhi Displacement karena beban gempa berlebih, sehingga perlu dilakukan peredaman kepada gempa yang terjadi. Selain itu, adanya ketidakberaturan struktur juga ditinjau terhadap pengaruh adanya penggunaan base isolation. Tujuan dari laporan ini untuk melakukan desain alternatif gedung dengan base isolator tipe Friction Pendulum System untuk membandingkan dengan sistem struktur lainnya terhadap interstory drift, base shear, displacement, dan fundamental period. Dari analisis yang sudah dilakukan, untuk perbandingan interstory drift akibat gempa, struktur base isolator memiliki interstory drift lebih kecil dibanding fixed base. Base isolator mampu mereduksi interstory drift rata-rata hingga 81.7% terhadap SRPMB, 73.6% terhadap SRPMK, 80.6% terhadap shearwall biasa. 79.4% terhadap shearwall khusus pada arah X serta 83.3% terhadap SRPMB, 75.7% terhadap SRPMK, 46.1% terhadap shearwall biasa. 42.8% terhadap shearwall khusus pada arah Y. Untuk perbandingan base shear base isolation lebih besar (meningkat) dibanding fixed base. Hal ini karena koefisien modifikasi respon, R , base isolation lebih kecil dibanding fixed base sehingga menghasilkan gaya gempa yang lebih besar. Namun Struktur dengan base isolator memiliki displacement pada daerah tingkat pertama lebih besar daripada struktur dengan base isolation namun bertambah dengan tidak signifikan daripada fix base.

Kata Kunci—Base Isolator, *Friction Pendulum System*, Kelas Situs Sedang, Ketidakberaturan Struktur.

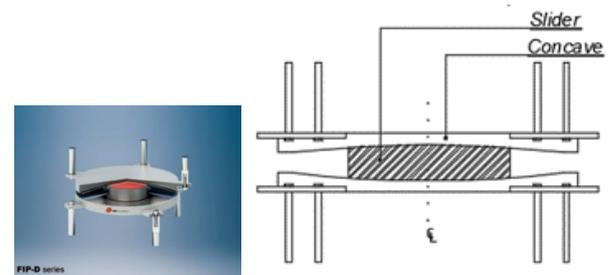
I. PENDAHULUAN

WILAYAH Malang tercatat sangat sering terjadi gempa. Karena letaknya berada pada daerah subduksi Lempeng Indo-Australia dengan Lempeng Eurasia. Lempeng tersebut memanjang sepanjang daerah selatan Jawa dari Banten hingga Banyuwangi [1]. Oleh karena itu, Malang salah satunya daerah yang sering terjadi Gempa Bumi karena letaknya berada pada daerah subduksi lempeng. Lempeng Indo-Australia menumbuk Lempeng Eurasia ke-arah utara dengan kecepatan 50-70 mm/thn [2]. Penunjaman terjadi sepanjang Sumatera-Jawa-Bali-Nusa Tenggara. Oleh karena itu pada daerah sepanjang penunjaman terdapat bentang alam berupa gunung dan pegunungan serta daerah rawan bencana.

Kondisi tersebut mengakibatkan terutamanya daerah Malang lebih sering terjadi gempa ber-skala besar daripada



Gambar 1. Variasi tipe *friction pendulum system*.

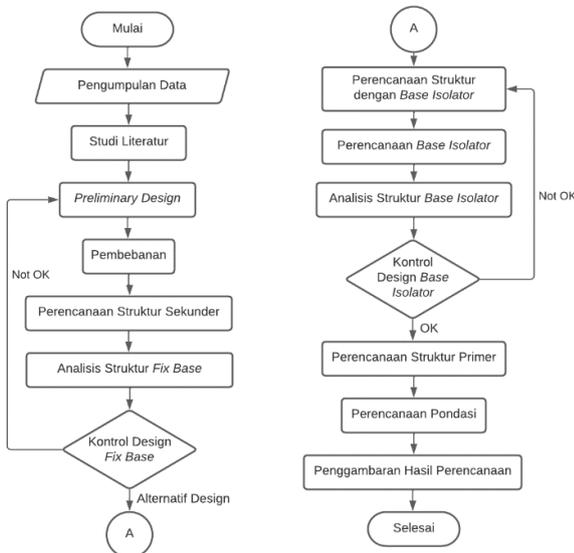


Gambar 2. Model *friction pendulum system*.

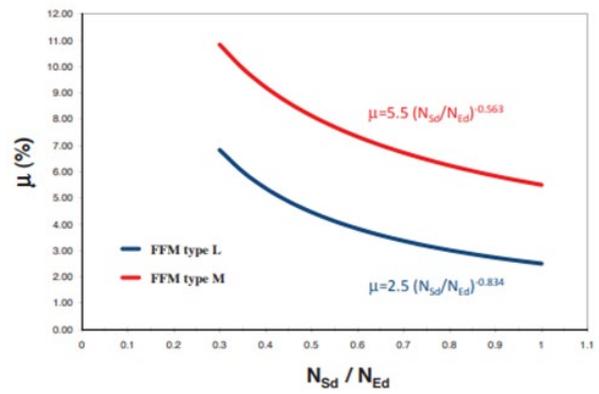
daerah Jawa Timur lainnya yang terletak tidak berada tepat pada posisi subduksi lempeng.

Objek perencanaan penelitian ini adalah bangunan Gedung Rumah Sakit Universitas Islam Malang Struktur bangunan beton bertulang dengan jumlah 9 lantai dengan tinggi 42.00 m. Penerapan struktur tahan gempa dilakukan dengan memberikan dinding geser (*shearwall*) atau struktur rangka pemikul momen khusus. Namun, penerapan sistem ini dapat menyebabkan bertambah kecilnya periode getar alami struktur tersebut. Hal tersebut sangat dihindari karena mengakibatkan bertambahnya gaya gempa dan simpangan antar lantai sehingga menyebabkan kerusakan signifikan pada bangunan untuk memperkecil bahaya tersebut, metode yang lebih baik adalah meredam energi gempa sehingga tidak membahayakan suatu bangunan.

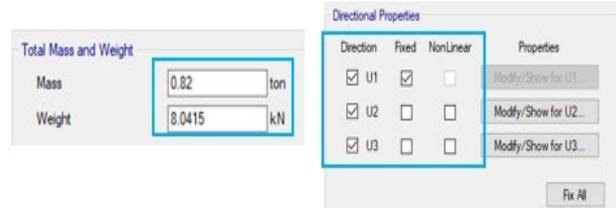
Telah dilakukan perhitungan ulang pada bangunan eksisting dengan Sistem Rangka Dinding Geser Beton Biasa, Sistem Rangka Dinding Geser Beton Khusus, Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB) dan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) [3]. Bahwa struktur tidak memenuhi Displacement karena beban gempa berlebih, sehingga perlu dilakukan peredaman kepada gempa yang terjadi. Selain itu, adanya ketidakberaturan struktur juga ditinjau terhadap pengaruh adanya penggunaan base isolation. Telah dikembangkan sebuah elemen yang berfungsi untuk meredam dan mereduksi gempa. Base Isolator atau



Gambar 3. Metodologi perencanaan.



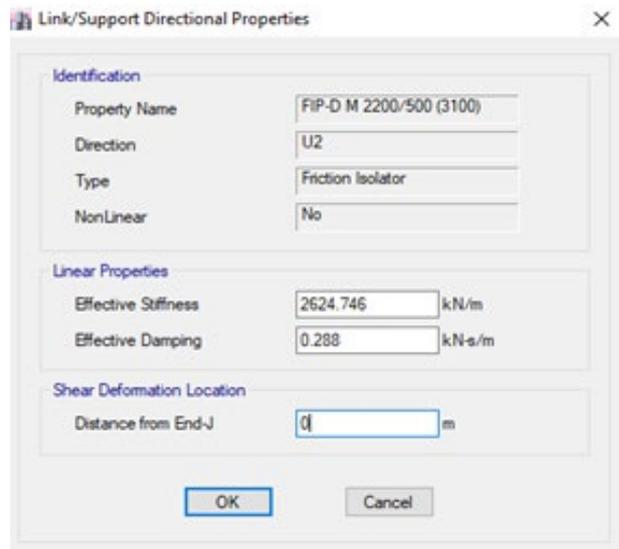
Gambar 5. Grafik koefisien gesek.



Gambar 6. Input mass dan directional properties.



Gambar 4. Metodologi perencanaan friction pendulum system.



Gambar 7. Input stiffness dan damping.

Base Iso talion System diciptakan secara fleksibel dimana kekakuan bangunan diisolasi pada pondasi di atas tanah. Hal tersebut diharapkan dapat mengurangi kejutan “shock” pada bangunan atas akibat gempa yang terjadi.

Oleh karena itu akan dilakukan komparasi terhadap modifikasi perencanaan struktur Gedung Rumah Sakit Universitas Islam Malang dengan Base Isolator. Yang akan dibandingkan adalah Base Isolator tipe *Friction Pendulum* (Gambar 1).

II. URAIAN PENELITIAN

A. Umum

Berdasarkan prinsip Manajemen Aset Infrastruktur dan Fasilitas, bangunan gedung harus dirancang sedemikian rupa sehingga bisa berfungsi dengan selamat, ekonomis, efektif dan efisien pada komponen infrastruktur dan komponen fasilitasnya [4]. Salah satu aspek keselamatan yang harus diperhatikan untuk Bangunan Gedung di Indonesia adalah keselamatan terhadap gempa bumi.

B. Sistem Isolasi Seismik

Sistem isolasi seismik berfungsi untuk memisahkan bangunan dari komponen horizontal gerakan tanah dengan memberikan isolator yang memiliki kekakuan yang relatif kecil antara bangunan atas dengan pondasi [5]. Selanjutnya diberikan isolator *device* diantara bangunan atas dan pondasi. Isolator *device* dipasang pada bangunan untuk membatasi energi gempa yang terjadi pada struktur bangunan. Bangunan dengan isolator *device* mempunyai frekuensi yang relatif lebih kecil dibanding dengan bangunan konvensional, sehingga mampu mengurangi perpindahan dan percepatan gempa yang bekerja pada bangunan. Frekuensi getar pertama hanya akan menyebabkan deformasi lateral pada sistem isolator *device*, sedangkan struktur atas akan berperilaku sebagai *rigid body motion*.

C. Friction Pendulum System

Base isolation memiliki prinsip memisahkan struktur utama bangunan dengan tanah [6]. Oleh karena itu ketika

Tabel 1.
Koefisien R, Cd, dan Ω_0 Fix Base

No	Sistem Pemikul Gaya Seismik	R	Ω_0	C_d	Batasan Sistem Struktur dan Batasan Tinggi Struktur, hn (m)				
C.	Sistem rangka pemikul momen				B	C	D	E	F
1.	Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	8	3	5.5	TB	TB	TB	TB	TB
2.	Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2.5	TB	TI	TI	TI	TI
D.	Sistem ganda dengan rangka pemikul momen khusus yang mampu menahan paling sedikit 25 % gaya seismik yang ditetapkan								
1.	Dinding geser beton bertulang khusus	7	2.5	5.5	TB	TB	TB	TB	TB
2.	Dinding geser beton bertulang biasa	6	2.5	5	TB	TB	TI	TI	TI

Tabel 2.
Koefisien R, Cd, dan Ω_0 Base Isolator

Sistem Pemikul Gaya Seismik	R	Ω_0	C_d
Sistem Struktur Base Isolator dan Beton Rangka Pemikul Momen Biasa	2	3	2

Tabel 3.
Faktor Redaman

Redaman efektif, β_M (persentase dari redaman kritis)	Faktor B_M
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2.0

gempa terjadi, tanah akan tetap mengalami pergerakan tetapi struktur utama bangunan akan tetap mempertahankan posisinya.

Salah satu jenis sistem isolasi dasar adalah *Friction Pendulum System* (FPS) [7]. Struktur bangunan atas diisolasi dari pondasi menggunakan bantalan dengan permukaan cekung yang memungkinkan struktur bergoyang di bawah periode alaminya sendiri selama peristiwa seismik terjadi. Sebagai *device* berbasis geser, FPS bekerja dengan prinsip gerakan yang sama dengan pendulum sederhana. Sistem pada FPS ini menggabungkan dua mekanisme mendasar, yaitu gesekan baja dengan permukaan cekung yang dilapisi *polytetrafluoroethylene* (PTFE) dengan gerakan *articulate slider* pada permukaan cekung.

Ada dua tahap dalam kinerja FPS, fase statis dan dinamis, dibedakan oleh gesekan dalam interfase geser [8]. Ketika kekuatan lateral yang bertindak pada struktur berada di bawah ketahanan gesekan yang terjadi, FPS bertindak sebagai koneksi kaku mentransfer kekuatan total antara struktur atas dan pondasi. Tetapi ketika gaya eksitasi lebih besar dari gaya gesekan statis, sistem akan diaktifkan. Struktur yang diberikan bergerak mirip dengan pendulum sederhana, sehingga memperkecil beban gempa yang diterima oleh struktur.

Terdapat 3 jenis model *Friction Pendulum System* yang dipelajari sampai saat ini, yaitu tipe generasi pertama dengan 2 pelat dan 1 *concave surface* [9]. Di mana *bearing plate* bergerak (*slides*) pada pelat lainnya. Selanjutnya terdapat tipe generasi kedua dengan 2 pelat 2 *concave surface* dengan memperoleh kapasitas gesekan dua kali lebih besar, kekakuan dua kali lebih besar dan lebih banyak kapasitas perpindahan bantalan dengan ukuran *sliders* lebih kecil dari generasi pertama. Pada tipe generasi ketiga merupakan pengembangan lebih lanjut dari generasi kedua, di mana pada pelat memiliki

rangkap dua *concave surface*. Sehingga generasi ketiga ini mampu lebih banyak menerima perpindahan, yaitu, memungkinkan disipasi lebih banyak energi gempa dengan ukuran *sliders* lebih kecil.

D. Kelas Situs

Pada kasus yang digunakan pada penelitian kali ini adalah penggunaan base isolator pada tanah sedang [10]. Meskipun sedikit kurang efektif karena rata-rata nilai geometrik (GM) memiliki nilai yang tidak jauh berbeda. Namun untuk kondisi tanah lunak, rata-rata geometrik (GM) menyajikan nilai yang lebih tinggi dan lebih lambat menurun untuk meningkatkan nilai *normalized friction* serta dispersi dan juga memberikan nilai tinggi untuk nilai rendah dari kedua periode terisolasi dan *normalized friction* karena efek resonansi.

E. Ketidakberaturan Struktur

Struktur harus diklasifikasikan beraturan atau tidak beraturan berdasarkan pada kriteria dalam pasal ini. Klasifikasi tersebut harus didasarkan pada konfigurasi horizontal dan vertikal dari struktur.

Struktur yang mempunyai satu atau lebih tipe ketidakberaturan yang diatur pada SNI 1726:2019 harus dinyatakan mempunyai ketidakberaturan struktur horizontal. Struktur-struktur yang didesain untuk kategori desain seismik sebagaimana yang terdapat dalam SNI 1726:2019 harus memenuhi persyaratan dalam pasal-pasal yang dirujuk.

Struktur yang mempunyai satu atau lebih tipe ketidakberaturan yang diatur pada SNI 1726:2019 harus dinyatakan mempunyai ketidakberaturan vertikal. Struktur-struktur yang didesain untuk kategori desain seismik sebagaimana yang terdapat dalam SNI 1726:2019 harus memenuhi persyaratan dalam pasal-pasal yang dirujuk.

Direncanakan gedung dengan alternatif *design* menggunakan tipe *Double Friction Pendulum System* karena

dalam brosur yang digunakan hanya mencakup tipe generasi kedua atau Double FPS (FIP-D) (Gambar 2).

III. METODOLOGI

A. Metodologi Perencanaan

Metodologi penelitian pada jurnal ini dijelaskan kedalam diagram alir pada Gambar 3.

B. Faktor R , C_d , dan Ω_0 dan I_e

Berdasarkan Tabel 1 dan Tabel 2 SNI 1726:2019 nilai koefisien modifikasi respons (R), faktor amplifikasi defleksi (C_d), dan faktor kuat lebih (Ω_0). Untuk parameter I_e dipakai 1.5 pada fix base untuk bangunan gedung penting, sedangkan pada bangunan base isolation I_e diizinkan 1.0.

C. Metodologi Perencanaan Friction Pendulum System

Metodologi perencanaan *Friction Pendulum System* dijelaskan kedalam diagram alir pada Gambar 4.

D. Pemilihan Tipe Friction Pendulum System

Perencanaan awal FPS dilakukan dengan menghitung beban pada masing-masing titik kolom pada hasil analisis struktur fixed base.

Beban vertikal, N_{sd} , dimodelkan adalah beban yang bekerja pada isolator selama gempa terjadi dengan N_{ED} adapalah kapasitas beban vertikal FPS. Analisis diambil dari hasil perhitungan ETABS dengan kombinasi pembebanan terbesar, yaitu 1.2D + L + Ev + Eh.

Koefisien gesek, μ , adalah fungsi dari beban vertikal, seperti yang ditunjukkan Gambar 5. Gaya horizontal maksimum, F_{max} merupakan hasil jumlah dari gaya gesek dan gaya pemulihan restoring akibat permukaan lengkung.

$$F_{Max} = \mu N_{sd} + \frac{N_{sd}}{R} d \quad (1)$$

Kekakuan efektif, K_e dan redaman viscous efektif, ζ_e didapatkan dengan persamaan:

$$K_e = N_{sd} \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{d} \right) \quad (2)$$

$$\zeta_e = \frac{2}{\pi} \frac{1}{\frac{d}{\mu R} + 1} \quad (3)$$

Perlu diketahui bahwa kekakuan efektif, K_e dan redaman viscous efektif, ζ_e bergantung pada perpindahan, d . Akibatnya, ketika diizinkan untuk memodelkan sistem isolasi sebagai linier ekivalen, prosedur iterasi harus diterapkan, sampai perbedaan nilai yang diasumsikan dengan nilai perpindahan menjadi sangat kecil.

Periode fundamental efektif, yaitu periode yang terkait dengan kekakuan efektif, dari struktur yang diisolasi dengan permukaan geser lengkung dapat dihitung sebagai berikut :

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{d} \right)}} \quad (4)$$

Kekakuan efektif maksimum, K_{Mmaks} , merupakan kekakuan pada kondisi displacement maksimum. D_m dan diasumsikan sebesar:

$$K_{M_{Max}} = 1.1 K_e \quad (5)$$

Nilai koefisien, B_M , diinterpolasi untuk mendapatkan nilai B_M sebagai berikut (Tabel 3):

$$B_M = \frac{\zeta_e - \beta_1}{\beta_2 - \beta_1} x (B_{M2} - B_{M1}) + B_{M1} \quad (6)$$

T_M adalah periode efektif struktur dengan isolasi seismik pada perpindahan maksimum, D_M dalam arah yang ditinjau:

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{M_{min}} \cdot g}} \quad (7)$$

Perpindahan maksimum, D_M , pada arah yang paling menentukan dari respons horizontal harus dihitung:

$$D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4\pi^2 B_M} \quad (8)$$

Setelah melakukan proses iterasi *displacement* dan gaya vertikal lebih lanjut hingga memperoleh hasil bahwa gaya vertikal tidak lagi berpengaruh pada tipe FPS dengan kontrol terhadap persamaan pada SNI 1726:2019.

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 12.8.3 Persamaan 141 didapatkan bahwa:

$$K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} \quad (9)$$

F merupakan gaya yang terjadi pada FPS yang di define pada Etabs, dan Δ merupakan displacement yang terjadi pada FPS Output Etabs.

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 12.5.3.2 Persamaan 130 didapatkan bahwa:

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{M_{min}} \cdot g}} \quad (10)$$

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 12.2.8.6 Persamaan 127 Kekakuan efektif, K_M , dari sistem isolasi pada perpindahan maksimum, D_M , harus dihitung menggunakan batas atas dan batas bawah perilaku gaya-perpindahan sebagai berikut:

$$K_M = \frac{\sum |Fm^+| + \sum |Fm^-|}{2D_M} \quad (11)$$

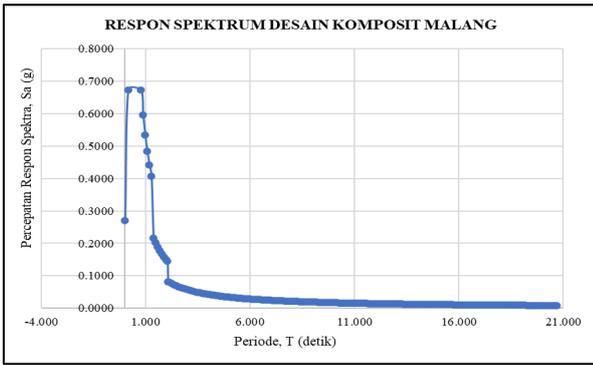
E. Beban Gempa Komposit

Pada analisis dinamis struktur dengan isolasi seismik, beban gempa respon spektrum dengan redaman awal 5% kemudian direduksi oleh faktor koefisien redaman efektif, B_M .

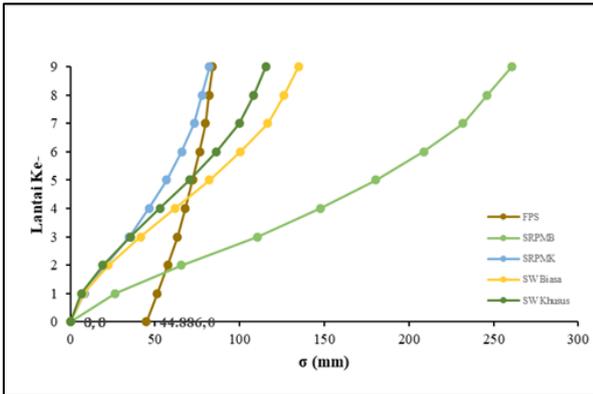
AASHTO mengisyaratkan adanya konversi nilai redaman efektif pada periode efektif struktur. *CIE 626 - Structural Control Chapter 11 - The AASHTO Design Guide* bahwa:

$$T > 0.8 T_{eff}, S_a \text{ isolation} = \frac{S_a}{B_M} \quad (22)$$

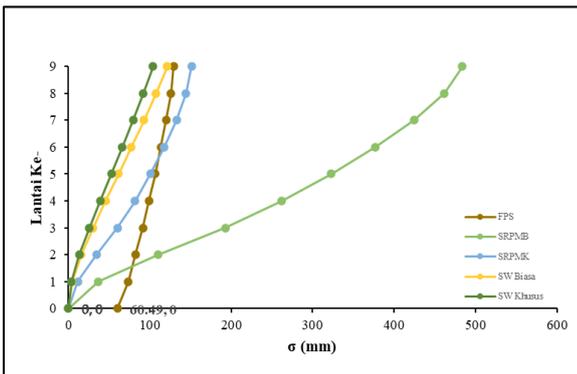
Untuk periode leboh besar dari $0.8 T_{eff}$, Nilai S_a pada respons spektrum diredam dengan nilai koefisien efektif B_M . Dalam penentuan periode struktur efektif T_{eff} dapat dihitung dengan persamaan:



Gambar 8. Respons spektrum desain komposit.



Gambar 9. Perbandingan perpindahan struktur arah X.



Gambar 1. Perbandingan perpindahan struktur arah Y.

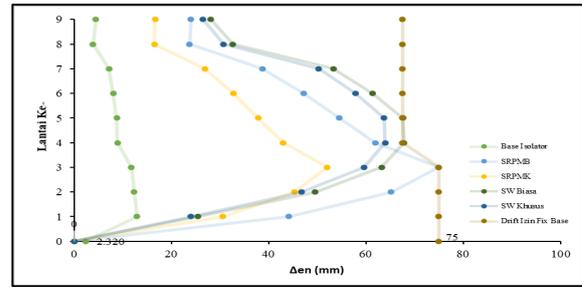
$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{\sum K_e g}} \quad (13)$$

Nilai W merupakan berat struktur total dengan beban kombinasi ultimate terbesar dengan K_e adalah nilai kekakuan setelah proses iterasi dilakukan.

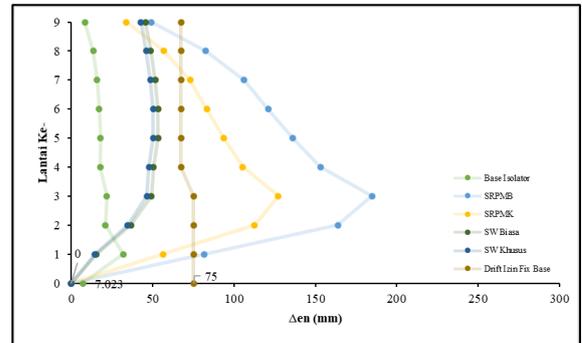
F. Modelisasi FPS

Perencanaan *Friction Pendulum System* direncanakan dengan *Link/Support Properties* dengan nilai sebagai pada Gambar 6 dan Gambar 7. Input Mass dari tipe yang digunakan dari hasil perhitungan serta model directional properties sebagai linier, namun diperlukan proses iterasi serta pendekatan nilai F_{Max} K_e dan ζ_e pada awal perencanaan seperti pada Gambar 6.

Pada Gambar 7 type *Link/Support Properties* dipilih *Friction Isolator*. Untuk *effective stiffness* digunakan hasil K_{eff} dari kontrol SNI 1726:2019 sedangkan *effective damping* diambil nilai ζ_e dari iterasi terakhir terhadap d hasil iterasi.



Gambar 11. Perbandingan simpangan antar lantai arah X.



Gambar 12. Perbandingan simpangan antar lantai arah Y.

IV. ANALISIS DAN DISKUSI

A. Respons Spektrum Komposit

Respons spektrum desain yang digunakan merupakan hasil modifikasi sesuai subbab 3E (Gambar 8).

B. Periode Fundamental Struktur

Periode fundamental struktur dengan base isolator tipe FPS meningkat 35.11% dari struktur fixed base pada Sistem Rangka Pemikul Momen dan 71.6% dari struktur Sistem ganda dengan rangka pemikul momen khusus Dinding Geser Beton, karena berkurangnya kekakuan struktur pada bagian dasar akibat penggunaan base isolator (Tabel 4).

C. Gaya Geser Dasar

Base shear pada base isolation FPS lebih besar (meningkat) dibanding fixed base (Tabel 5). Hal ini karena koefisien modifikasi respon, R , base isolation lebih kecil dibanding fixed base sehingga menghasilkan gaya gempa yang lebih besar.

D. Perpindahan

Perbandingan displacement akibat gempa dari Gambar 8 dan Gambar 9 serta Gambar 10. di atas, struktur dengan base isolator memiliki displacement pada daerah tingkat pertama lebih besar daripada struktur dengan base isolation namun bertambah dengan tidak signifikan daripada fix base.

E. Simpangan Antar Lantai

Perbandingan simpangan antar lantai akibat gempa dari Tabel 4 dan Tabel 5, struktur dengan base isolator memiliki simpangan antar lantai yang lebih kecil dibanding struktur fixed base (Gambar 11 dan Gambar 12).

Penggunaan base isolator mampu mereduksi simpangan antar lantai rata-rata hingga 81.7% terhadap SRPMB, 73.6% terhadap SRPMK, 80.6% terhadap SW Biasa. 79.4% terhadap SW khusus pada arah X serta 83.3% terhadap SRPMB, 75.7% terhadap SRPMK, 46.1% terhadap SW

Tabel 4.
Perbandingan Periode Fundamental Struktur

Sistem Struktur	$T_a = C_t h_n^x$	T_{max}	T_{min}	Tx Etabs	Ty Etabs	Tx Pakai	Ty Pakai
Base Isolator	1.35	3.78	1.36	3.06	2.58	2.54	2.54
SRPMB	1.35	1.89	1.35	2.75	2.29	1.89	1.88
SRPMK	1.35	1.89	1.35	2.75	2.29	1.89	1.88
SW Beton Biasa	1.35	1.89	1.35	1.93	1.48	1.89	1.48
SW Beton Khusus	1.35	1.89	1.35	1.93	1.48	1.89	1.48

Tabel 5.
Perbandingan Geser Dasar

Sistem Struktur	Arah X (KN)	Arah Y (KN)	Selisih Arah X (%)	Selisih Arah Y (%)
Base Isolator	20006.87	20046.87		
SRPMB	13854.587	13886.412	44%	44%
SRPMK	4586.1962	4583.5205	336%	337%
SW Beton Biasa	10385.41	10389.56	93%	93%
SW Beton Khusus	8901.78	8905.32	125%	125%

Biasa. 42.8% terhadap SW khusus pada arah Y. Hal ini sangat berdampak positif bagi bangunan yaitu dapat mengurangi kerusakan non struktural.

V. KESIMPULAN

Meskipun terjadi peningkatan periode fundamental struktur dan geser dasar akibat penggunaan base isolator yang terjadi lebih besar serta displacement tingkat pertama yang lebih besar, namun displacement rata-rata serta interstory drift dengan menggunakan base isolator lebih kecil dari pada sistem struktur SRPMB, SRPMK, Shearwall Biasa dan Shearwall Khusus.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Bock *et al.*, "Crustal motion in Indonesia from global positioning system measurements," *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 108, no. B8, 2003, doi: 10.1029/2001jb000324.
- [2] A. M. Lubis, "Telaah ulang pergerakan lempeng tektonik Indo-Australia dengan menggunakan data GPS tahun 1994-2016," *J. Online Phys.*, vol. 5, no. 2, pp. 12-16, 2020, doi: 10.22437/jop.v5i2.9751.
- [3] E. Meral, "Determination of seismic isolation effects on irregular RC buildings using friction pendulums," *Structures*, vol. 34, pp. 3436-3452, 2021, doi: 10.1016/j.istruc.2021.09.062.
- [4] Pemerintah RI, "Peraturan Pemerintah (PP) tentang Peraturan Pelaksanaan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung." Pemerintahan Republik Indonesia, Jakarta, 2021.
- [5] J. Csavina, J. Field, O. Félix, A. Y. Corral-Avitia, A. E. Sáez, and E. A. Betterton, "Effect of wind speed and relative humidity on atmospheric dust concentrations in semi-arid climates," *Sci. Total Environ.*, vol. 487, pp. 82-90, 2014, doi: 10.1016/j.soildyn.2019.105752.
- [6] M. Arifin, L. Fransisca, and A. Sagara, "Studi perbandingan gedung dengan iregularitas horizontal menggunakan base isolation dan fixed base," *J. Manaj. Aset Infrastruktur Fasilitas*, vol. 3, no. 2, 2019, doi: 10.12962/j26151847.v3i2.5882.
- [7] S. Arathy and P. M. Manju, "Analysis of friction pendulum bearing isolated structure," *Int. Res. J. Eng. Tech.*, vol. 3, pp. 317-322, 2016.
- [8] I. Imran, D. M. Siringoringo, and J. Michael, "Seismic performance of reinforced concrete buildings with double concave friction pendulum base isolation system: case study of design by Indonesian code," in *Structures*, 2021, vol. 34, pp. 462-478, doi: 10.1016/j.istruc.2021.07.084.
- [9] C. A. Barrera-Vargas, I. M. D'iaz, J. M. Soria, and J. H. Garcia-Palacios, "Enhancing friction pendulum isolation systems using passive and semi-active dampers," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 16, p. 5621, 2020, doi: 10.3390/app10165621.
- [10] M. M. Monkul, E. Etmnan, and A. Senol, "Influence of coefficient of uniformity and base sand gradation on static liquefaction of loose sands with silt," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 89, pp. 185-197, 2016, doi: 10.1016/j.soildyn.2016.08.025.