

Perbandingan Perilaku Seismik Struktur *High-Rise* Beton Bertulang dengan Penerapan *Base Isolator* LRB dan FPS

Hegar Wahyu Pamungkas^{1*}, Nurul Rochmah²

^{1,2}Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya, Surabaya, Indonesia

*Koresponden email: hegararchgr@gmail.com

Diterima: 10-11-2025

Disetujui: 27-11-2025

Abstract

Banda Aceh is located in a region with high seismic activity due to the interaction between the Indo-Australian and Eurasian plates, making high-rise buildings in this area require a reliable earthquake-resistant structural design. This study aims to analyze and compare the dynamic behavior of reinforced concrete structures using Lead Rubber Bearing (LRB) and Friction Pendulum System (FPS) base isolation systems against the conventional fixed-base system. The modeling was carried out on a 10-story apartment building using ETABS v.17, referring to SNI 1726:2019, SNI 1727:2020, and SNI 2847:2019 standards. The analysis results show that the base isolation systems reduce inter-story drift by up to 77% for FPS and 49% for LRB compared to the fixed-base model, but increase the total structural displacement with maximum values reaching 2254% for LRB and 1889% for FPS due to isolator movement. Furthermore, the base shear force increased approximately 3.16 times for LRB and 3.40 times for FPS compared to the fixed-base system. The use of isolation also significantly extends the structural vibration period, with the largest increase in the first mode reaching 77% for LRB and 67% for FPS. Overall, the implementation of base isolation effectively enhances structural flexibility and seismic response while reducing potential structural and non-structural damage in earthquake-prone regions.

Keywords: *Base Isolation, Lead Rubber Bearing (LRB), Friction Pendulum System (FPS), ETABS, Reinforced Concrete Structure.*

Abstrak

Banda Aceh merupakan wilayah dengan aktivitas seismik tinggi akibat pertemuan lempeng Indo-Australia dan Eurasia, sehingga bangunan bertingkat di kawasan ini memerlukan perancangan struktur tahan gempa yang andal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan perilaku dinamik struktur beton bertulang dengan sistem isolasi dasar tipe *Lead Rubber Bearing (LRB)* dan *Friction Pendulum System (FPS)* terhadap sistem konvensional *fixed base*. Pemodelan dilakukan pada gedung apartemen 10 lantai menggunakan ETABS v.17 dengan acuan SNI 1726:2019, SNI 1727:2020, dan SNI 2847:2019. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem isolasi dasar menurunkan simpangan antar lantai hingga 77% untuk FPS dan 49% untuk LRB dibandingkan *fixed base*, namun meningkatkan simpangan total struktur dengan nilai maksimum 2254% untuk LRB dan 1889% untuk FPS akibat pergerakan isolator. Selain itu, gaya geser dasar struktur berisolasi meningkat sekitar 3,16 kali untuk LRB dan 3,40 kali untuk FPS dibandingkan sistem *fixed base*. Penggunaan isolasi juga memperpanjang periode getar struktur secara signifikan, di mana peningkatan terbesar pada mode pertama mencapai 77% untuk LRB dan 67% untuk FPS. Secara keseluruhan, penerapan sistem isolasi dasar efektif meningkatkan fleksibilitas dan respons seismik bangunan, serta mengurangi potensi kerusakan struktural maupun non-struktural pada wilayah rawan gempa.

Kata Kunci: *Base Isolation, Lead Rubber Bearing (LRB), Friction Pendulum System (FPS), ETABS, Struktur Beton Bertulang.*

1. Pendahuluan

Keberagaman bentuk struktur tanah di Indonesia dipengaruhi oleh letak geografisnya yang berada di antara tiga lempeng tektonik utama dunia, yaitu lempeng Eurasia, Pasifik, Filipina, dan Indo-Australia [1]. Indonesia telah menghadapi berbagai peristiwa seismik besar, termasuk gempa Aceh, Padang, Yogyakarta, Palu, dan Banten, yang mengakibatkan kerusakan fisik, korban jiwa, serta dampak negatif terhadap

lingkungan [2]. Dengan demikian, bangunan pada area rawan gempa harus tetap berdiri saat gempa terjadi untuk memastikan keselamatan penghuninya dan mengurangi risiko korban jiwa [3]. Hal ini menjadi tantangan khusus dalam pelaksanaan konstruksi *high rise building*. bangunan bertingkat tinggi memiliki tingkat kompleksitas yang tinggi karena terdiri atas banyaknya komponen dan elemen struktural, sehingga untuk memenuhi persyaratan keselamatan dan desain diperlukan stabilitas struktural yang optimal [4]. Oleh karena itu gempa-gempa tersebut berperan penting dalam mendorong perbaikan peraturan-peraturan tentang bangunan dengan fokus pada daktilitas, redundansi, dan disipasi energi sebagai elemen penting dalam ketahanan terhadap gempa [5]. Mengacu pada respon positif dalam mengurangi dampak akibat gempa dengan skala besar selama kejadian seperti Northridge 1994 dan Kobe 1995, sistem isolasi dasar (*Base Isolation System/BIS*) dianggap menjadi solusi paling efektif untuk memisahkan bagian atas bangunan dari tanah [6].

Salah satu jenis base isolation dari karet yaitu *Lead Rubber Bearings* (LRBs) adalah isolator dasar yang dimodifikasi dari bantalan karet alam berlaminasi linear (LNR) dengan menambahkan inti timah di tengahnya, yang saat terjadi guncangan gempa kuat akan mengalami deformasi inelastis, menunjukkan sifat nonlinier tinggi, dan menyerap energi dalam jumlah besar [7]. Selain itu, sistem ini efektif mengurangi respon seismik total dan menunjukkan kinerja yang semakin optimal pada bangunan bertingkat tinggi [8]. Penerapan nyata penggunaan *Lead Rubber Bearings* (LRBs) telah dibuktikan dalam proyek *China Basin Landing* yang berlokasi di San Francisco, California, di mana sistem tersebut mampu menahan perpindahan lebih dari 40 inci, atau sekitar 1 meter [9]. Sementara itu, *Friction Pendulum System* (FPS) juga masif digunakan karena memiliki kestabilan sifat fisik dan daya tahan tinggi, dengan mekanisme isolasi yang menggabungkan gesekan antara permukaan baja yang dipisahkan oleh suatu lapisan teflon serta gerakan pendular dari slider pada permukaan bulat sempurna [10]. FPS yang memiliki koefisien gesek tinggi cenderung menunjukkan kemampuan *re-centering* yang terbatas, sehingga keberadaan perpindahan sisa (*residual displacement*) dapat meningkatkan risiko kerusakan pada saat terjadi gempa susulan, khususnya pada gempa berintensitas rendah [11].

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, penggunaan sistem base isolation pada bangunan di Indonesia masih tergolong minim. Oleh karena itu, dilakukan studi komparatif terhadap penggunaan dua jenis base isolator, yaitu *Friction Pendulum System* (FPS) dan *Lead Rubber Bearings* (LRB), pada gedung beton bertulang bertingkat. Dalam penelitian ini, penulis membandingkan tiga model perencanaan gedung beton bertulang 8 lantai, yaitu: (1) gedung dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) sebagai sistem *fixed base*, (2) gedung dengan sistem isolasi dasar tipe FPS, dan (3) gedung dengan sistem isolasi dasar tipe LRB. Tahapan perencanaan diawali dengan perancangan model *fixed base* sebagai acuan, kemudian dilanjutkan dengan pemodelan kedua sistem isolasi dasar serta komparasi simpangan antar tingkat, *story displacement*, gaya geser dasar dan periode struktur dari ketiga model tersebut.

2. Kajian Pustaka

2.1 Konsep Isolasi Seismik

Isolasi seismik merupakan suatu sistem perlindungan bangunan terhadap gempa bumi dengan menempatkan perletakan yang bersifat fleksibel (*base isolator*) antara pondasi dan dasar struktur bangunan yang memiliki kemampuan untuk memisahkan pergerakan horizontal tanah dari struktur bangunan, sehingga gaya gempa yang diteruskan ke bangunan dapat diminimalkan [12]. Pada bangunan yang menggunakan base isolator, getaran dari pondasi terlebih dahulu diredam oleh bantalan karet yang bersifat elastis, sehingga arah getaran yang acak dapat diminimalkan, dan struktur bangunan di atasnya tetap bergerak secara stabil sebagai satu kesatuan tanpa mengalami deformasi berlebihan [13].

Menurut [14] Sistem base isolation terdiri dari unit isolasi yang dapat digunakan dengan atau tanpa komponen isolasi tambahan, dimana:

- Base isolation berfungsi untuk mengurangi atau memutuskan transfer getaran dari tanah ke struktur di atasnya, khususnya selama gempa bumi.
- Sambungan antara base isolation dan sistem struktur lainnya tidak memiliki efek *decoupling* secara langsung, yang artinya *base isolation* berfungsi sebagai elemen struktural pendukung tanpa memberikan kontribusi terhadap pemisahan gerakan.

2.2 *Lead Rubber Bearing*

Lead Rubber Bearing (LRB) merupakan jenis bantalan yang memiliki inti berupa logam yang dilapisi oleh karet alam dan dilaminasi bersama pelat baja, kombinasi kedua bahan tersebut menyatukan kekuatan

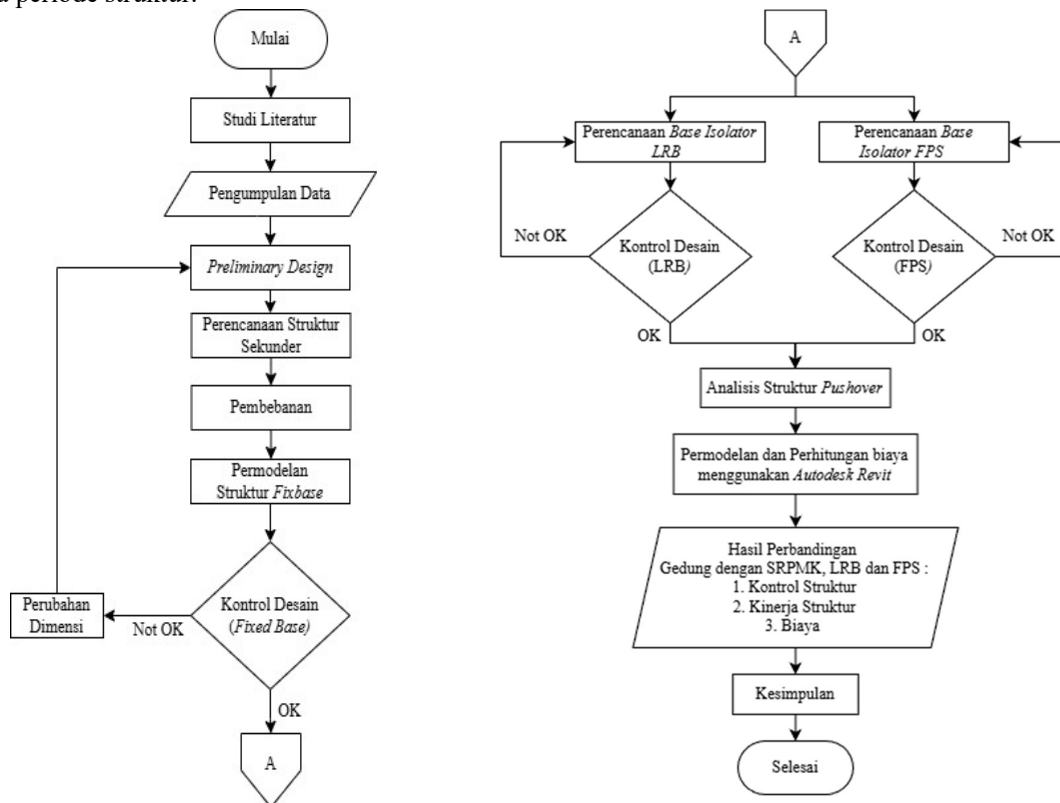
karet dan baja laminasi dengan kemampuan inti logam untuk menyerap gaya lateral, termasuk gaya akibat gempa bumi [13].

2.3 Friction Pendulum System

Friction Pendulum System lambat laun masif digunakan karena memiliki kelebihan seperti kestabilan dan ketahanan yang baik, FPS menggabungkan dua mekanisme dasar, yaitu gesekan baja yang dipisahkan oleh lapisan teflon dan gerakan pendulum pada permukaan lengkung [15].

3. Metode Penelitian

Penelitian ini membandingkan kinerja struktur gedung apartemen 10 lantai SRPMK dan *sistem base isolation* (LRB dan FPS), sedangkan pemodelan serta pendefinisian beban dilakukan menggunakan perangkat lunak ETABS v.17. Hasil analisis dari setiap model kemudian dibandingkan untuk mengevaluasi perbedaan perilaku struktur mencakup simpangan antar tingkat, *story Displacement*, gaya geser dasar dan juga periode struktur.



Gambar 1. Diagram Alir Perencanaan

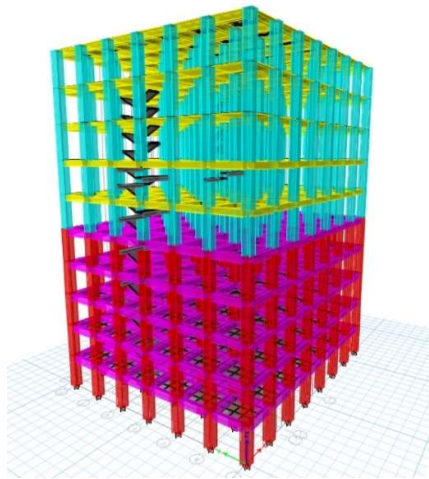
3.1 Studi Literatur

Literatur yang digunakan dalam perencanaan gedung ini terdiri atas dua kelompok utama, yaitu peraturan dan studi literatur. Peraturan yang dijadikan acuan meliputi SNI 1726:2019 tentang Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung, SNI 1727:2020 tentang Beban Minimum untuk Perencanaan Bangunan Gedung dan Struktur Lain, serta SNI 2847:2019 mengenai Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung. Selain itu, studi literatur mencakup penjelasan dan hasil penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan perancangan struktur beton serta analisis kinerja struktur bangunan tahan gempa. Referensi yang digunakan antara lain buku *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice* karya N. and Kelly. (1999), dan *Struktur Gedung Tahan Gempa Dengan Sistem Isolasi Konsep Dasar Dan Contoh Perencanaan* karya Ahmad Basshofi Habieb (2023).

3.2 Pengumpulan Data

Pada tahap pengumpulan data ini, dilakukan perbandingan antara fixed base, base isolation tipe Lead Rubber Bearing (LRB) dan Friction Pendulum System, dengan menggunakan satu jenis pemodelan data sebagaimana dijelaskan berikut.

- Data umum bangunan :
 - Tipe bangunan : Apartemen
 - Lokasi bangunan : Aceh
 - Data gempa : *Response Spectrum Aceh*
 - Jumlah lantai : 10 lantai
 - Tinggi bangunan : 40 meter
 - Tinggi lantai : 4 meter (lantai 1 – 8)
 - Panjang bangunan : 28 meter
 - Lebar bangunan : 24 meter
- Data material
 - Mutu beton (f_c') : 30 Mpa
 - Mutu baja tulangan lentur : BJTS 420B
 - Kuat Tarik Leleh, F_y : 420 Mpa
 - Kuat Tarik Fraktur, F_u : 545 Mpa
 - Mutu baja tulangan geser : BJTS 280
 - Kuat Tarik Leleh, F_y : 280 Mpa
 - Kuat Tarik Fraktur, F_u : 405 Mpa



Gambar 2. Model Gedung 10 Lantai

3.3 Data Gempa

- Parameter Gempa
 - Kelas Situs : SE (Tanah Lunak)
 - Kategori Risiko : 2
 - Faktor Keutamaan Gempa (I_e) : 1
 - PGA : 0.5887
 - S_s : 1.4695
 - S_1 : 0.5839
 - F_a : 0.8122
 - F_v : 3.1322
- Parameter Percepatan Gempa
 - $S_{ms} = F_a \times S_s$: 1.19353
 - $S_{m1} = F_v \times S_1$: 1.82889
- Parameter percepatan spectral desain
 - $S_{ds} = 2/3 \times S_{ms}$: 0.7957
 - $S_{d1} = 2/3 \times S_{m1}$: 1.2193

4. Hasil Dan Pembahasan

4.1 Dimensi Komponen Struktur

Berdasarkan hasil perhitungan preliminary design mengacu pada SNI 2847:2019 tentang Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung, diperoleh dimensi komponen struktur utama sebagai berikut :

Tabel 1. Dimensi Komponen Struktur

Tipe Komponen Struktur	Dimensi	Kode	Penempatan Komponen Struktur
Pelat Lantai	t = 120 mm	S1	Semua Lantai
Balok Anak	350 mm x 500 mm	BB	Semua Lantai
Balok Induk	500 mm x 750 mm	B1	Lantai 1 – 5
Balok Induk	450 mm x 650 mm	B2	Lantai 6 – 10
Kolom	850 mm x 850 mm	K1	Lantai 1 – 5
Kolom	800 mm x 800 mm	K2	Lantai 6 – 10

4.2 Parameter *Lead Rubber Bearing*

Untuk kolom eksterior bangunan, digunakan base isolator tipe LRB dari produk Bridgestone dengan seri **LH090G4 - F** dan untuk kolom interior bangunan akan digunakan LRB dengan seri **LH095G4 - F**. Properti atau karakteristik dari LRB yang digunakan dijabarkan pada tabel di bawah ini :

Tabel 2. Parameter *Base Isolation* LRB

Parameter	Notasi	Tipe LRB BRIDGESTONE		Satuan	Sumber
		Eksterior	Interior		
Tipe LRB		LH090G4 - F	LH095G4 - F		
Pu (Service) Kolom	P	2519.7381	3786.0216	kN	Hasil ETABS
Jumlah Isolator	n	26	30	n	Denah
Diameter Luar Isolator	D _B	900	950	D	Brosur
Diameter Lead Plug	D _L	130	130	mm	Brosur
Ketebalan total karet	Tr	198	198	mm	Brosur
Kekakuan Vertikal	K _v	3800000	4210000	kN/m	Brosur
Kekakuan awal	k ₁	16300	16300	kN/m	Brosur
Tegangan Kritis	σ _{cr}	66	74	Mpa	Brosur
Kekakuan pasca leleh	k ₂	1250	1390	kN/m	Brosur
Kekuatan Lead Plug	Q _d	106	123	kN	Brosur
Kekakuan Efektif	K _{eq}	1780	2010	kN/m	Brosur
Redaman Efektif	ξ _{eq}	18.40%	18.90%	%	Brosur
Luas Penampang Isolator	A	636172.51	708821.84	mm ²	Perhitungan Luas
Luas Penampang Lead Plug	A _p	13273.23	13273.23	mm ²	Perhitungan Luas
Luas Penampang Efektif Isolator	A _r	622899.28	695548.61	mm ²	A _r - A _p
Tegangan Tekan Pada Isolator	p _i	4.05	5.44	Mpa	P.service / A.eff
Tegangan geser leleh dari lead plug	Gr	0.385	0.385	Mpa	Brosur
Modulus geser semu Lead	σ _p	0.5836	0.5836	Mpa	Brosur
Tegangan geser pada saat leleh untuk lead	σ _{pb}	7.9676	7.9676	Mpa	Brosur
Shear Strain Maksimum	γ _m	2.5	2.5	-	Brosur
Berat Isolator	Mass	1519.35	1631.52	kg	Brosur

- Periode Efektif (T_M)
Menurut SNI 1726:2019 pasal 12.5.3.2, ditetapkan nilai periode efektif struktur saat mengalami perpindahan maksimum. Berikut ini adalah perhitungan untuk menentukan periode efektif (T_M):
 - Massa gedung (m) = 16600.35595 kN
 - Kekakuan efektif total (KM) = 73.510 kN/mm

- Periode Efektif (TM) $= 2\pi \sqrt{\frac{W}{Km g}} = 2\pi \sqrt{\frac{146652.481}{73.510 \times 9810}} = 2.833 \text{ detik}$
- Perpindahan Maksimum Dinamis (DM)
 - Percepatan spektral maks. (SM1) = 1.187 g
 - Periode efektif (TM) = 2.833 s
 - Periode struktur jepit (T) = 1.353 s
 - Koefisien numerik (BM) = 1.46 (Interpolasi Tabel 36 SNI 1726:2019)
 - Perpindahan maksimum (DM) $= \frac{g \times SM1 \times TM}{4\pi^2 Bm} = \frac{9.81 \times 1.187 \times 2.833}{4\pi^2 \times 1.46} = 0.57223 \text{ m} = 572.23 \text{ mm}$
 - Perpindahan maksimum dinamis (D'M) $= \frac{Dm}{\sqrt{1 + (\frac{T}{Tm})^2}} = \frac{0.57223}{\sqrt{1 + (\frac{1.353}{2.833})^2}} = 0.51638 \text{ m} = 516.38 \text{ mm}$

4.3 Parameter *Friction Pendulum System*

FPS double concave sliding bearing akan menggunakan produk dari FIP industriale dengan tipe **FIP-D M 3050/500** untuk kolom eksterior dan **FIP-D M 2200/500** untuk kolom Interior, Properti atau karakteristik dari FPS yang digunakan dijabarkan pada tabel di bawah ini :

Tabel 3. Parameter Base Isolation FPS

Parameter	Notasi	Tipe FPS <i>FIP industriale</i>		Satuan	Sumber
		Eksterior	Interior		
Tipe LRB		FIP-D M 3550/800	FIP-D M 2700/800		
Pu Service	Pu	2519.74	3786.02	kN	Hasil ETABS
Jumlah Isolator	n	26	30	-	Denah
Pu Kapasitas Isolator	N _{ed}	3100	3950	kN	Brosur
Radius kelengkungan pelat cekung	R1 = R2	3100	3100	mm	Brosur
Diameter Isolator	D	640	670	mm	Brosur
Tinggi Isolator	h	152	146	mm	Brosur
Koefisien Gesek	μ	5.50%	5.50%	-	Brosur
<i>displacement</i>	d	200	200	mm	Brosur
Kuat Karakteristik	Qd	170.5	217.25	kN	μ.N.ed
Kekakuan pasca leleh	k2	1000.00	1274.193548	kN/m	N.ed/R
Kuat Karakteristik Maksimal	Qd _{max}	370.50	472.09	kN	Rumus
Kekakuan Efektif	K _{eq}	1852.50	2360.44	kN/m	Rumus
Redaman Efektif	ξ _{eq}	29.30%	29.30%	%	Rumus
Berat Isolator	Mass	290.00	290.00	kg	Brosur
	Weight	2.84	2.84	kN	Brosur

- Periode Efektif Fundamental (Te)

Periode fundamental efektif menggambarkan waktu getar yang berhubungan dengan kekakuan efektif dari sistem isolasi. Pada struktur yang dilengkapi dengan isolator tipe peluncur berpermukaan melengkung (*curved surface slider*), besarnya periode ini dapat dihitung secara perkiraan menggunakan persamaan berikut :

 - Periode Efektif Fundamental (Te) $= 2\pi \sqrt{\frac{1}{g(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{d})}} = 2.595 \text{ detik}$
- Periode Efektif (T_m)

Struktur yang menggunakan perangkat isolasi tersebut tidak ditentukan oleh massa bangunannya, tetapi terutama oleh jari-jari kelengkungan (R). Persamaan Periode Efektif Fundamental (T_m) dijelaskan sebagai berikut :

$$\text{Periode Efektif}(T_m) = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{3,7 \text{ m}}{9,81}} = 3.532 \text{ detik}$$

- Perpindahan Maksimum Dinamis (D_M)
 - Percepatan spektral maks. (S_{M1}) = 1.1866 g
 - Periode efektif (T_M) = 2.595 s
 - Periode struktur jepit (T) = 1.353 s
 - Koefisien numerik (BM) = 1.686 (Interpolasi Tabel 36 SNI 1726:2019)
 - Perpindahan maksimum (DM) = $\frac{g \times S_{M1} \times T_M}{4\pi^2 B_m} = \frac{9,81 \times 1.1866 \times 2.595}{4\pi^2 \times 1.686} = 0.45386 \text{ m} = 453.86 \text{ mm}$
 - Perpindahan maksimum dinamis (D^*M) = $\frac{D_m}{\sqrt{1 + (\frac{T}{T_m})^2}} = \frac{0.45386}{\sqrt{1 + (\frac{1.353}{2.595})^2}} = 0.40245 \text{ m} = 402.45 \text{ mm}$

4.4 Perbandingan Simpangan Antar Tingkat

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.12.1, untuk sistem SRPMK dengan kategori risiko II, batas simpangan antar lantai ditetapkan sebesar $0.015385h_s^x$. Selain itu, sesuai Pasal 7.12.1.1, pada sistem struktur dengan KDS D, E, dan F, nilai simpangan antar lantai harus lebih kecil dari $\Delta a/\rho$, di mana faktor ρ diatur dalam Pasal 7.3.4.2 dengan nilai sebesar 1,3. Sedangkan untuk struktur dengan sistem isolasi maka batas simpangan antar lantai ditetapkan sebesar $0.015h_s^x$

$$\frac{\Delta a}{\rho} = 61,538 \text{ mm} \quad (\text{Untuk } fixed \text{ base})$$

$$\frac{\Delta a}{\rho} = 60 \text{ mm} \quad (\text{Untuk } isolated \text{ base})$$

Tabel 4. Simpangan Antar Tingkat SRPMK

Story	Simpangan Hasil		Simpangan		h	Simpangan Antar		Simpangan Izin	Cek
	δe_x	δe_y	δe_x	δe_y		Δ_x	Δ_y		
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		
10	73.46	74.92	2.84	2.94	4000	15.61	16.15	61.54	Safe
9	70.62	71.99	4.85	5.05	4000	26.65	27.76	61.54	Safe
8	65.77	66.94	7.17	7.38	4000	39.44	40.57	61.54	Safe
7	58.60	59.56	8.93	9.15	4000	49.10	50.34	61.54	Safe
6	49.68	50.41	9.09	9.30	4000	50.01	51.13	61.54	Safe
5	40.58	41.12	8.51	8.68	4000	46.82	47.75	61.54	Safe
4	32.07	32.43	9.02	9.17	4000	49.62	50.44	61.54	Safe
3	23.05	23.26	9.35	9.47	4000	51.40	52.10	61.54	Safe
2	13.70	13.79	8.76	8.83	4000	48.15	48.58	61.54	Safe
1	4.95	4.96	4.95	4.96	4000	27.21	27.27	61.54	Safe
Base	0.00	0.00	0.00	0.00	4000	0.00	0.00	61.54	Safe

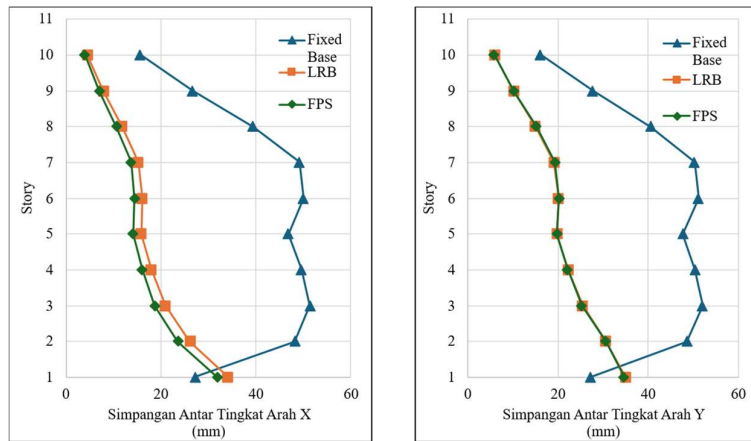
Tabel 5. Simpangan Antar Tingkat LRB

Story	Simpangan Hasil		Simpangan		h	Simpangan Antar		Simpangan Izin	Cek
	δe_x	δe_y	δe_x	δe_y		Δ_x	Δ_y		
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		
10	232.60	232.77	2.23	3.01	4000	4.45	6.02	60.00	Safe
9	230.38	229.76	3.94	5.09	4000	7.88	10.17	60.00	Safe
8	226.44	224.67	5.93	7.51	4000	11.86	15.01	60.00	Safe
7	220.51	217.17	7.61	9.55	4000	15.23	19.10	60.00	Safe
6	212.90	207.61	8.05	10.07	4000	16.10	20.13	60.00	Safe
5	204.85	197.55	7.93	9.90	4000	15.86	19.79	60.00	Safe
4	196.92	187.65	8.99	11.11	4000	17.98	22.22	60.00	Safe
3	187.93	176.54	10.48	12.74	4000	20.95	25.47	60.00	Safe
2	177.45	163.81	13.09	15.32	4000	26.19	30.63	60.00	Safe
1	164.36	148.49	17.05	17.52	4000	34.10	35.03	60.00	Safe
Base	147.31	130.98	147.31	130.98	4000	294.61	261.95	60.00	-

Tabel 6. Simpangan Antar Tingkat FPS

Story	Simpangan Hasil		Simpangan		h	Simpangan Antar		Simpangan Izin	Cek
	δe_X	δe_Y	δe_X	δe_Y		Δ_X	Δ_Y		
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		
10	170.12	185.88	1.99	2.90	4000	3.98	5.80	60.00	Safe
9	168.13	182.98	3.54	5.08	4000	7.08	10.16	60.00	Safe
8	164.59	177.90	5.34	7.59	4000	10.67	15.18	60.00	Safe
7	159.26	170.32	6.85	9.68	4000	13.69	19.35	60.00	Safe
6	152.41	160.64	7.21	10.15	4000	14.43	20.30	60.00	Safe
5	145.20	150.49	7.08	9.90	4000	14.16	19.79	60.00	Safe
4	138.12	140.59	8.01	11.06	4000	16.01	22.11	60.00	Safe
3	130.11	129.54	9.33	12.64	4000	18.67	25.29	60.00	Safe
2	120.78	116.89	11.80	15.35	4000	23.59	30.69	60.00	Safe
1	108.98	101.55	15.92	17.30	4000	31.85	34.61	60.00	Safe
Base	93.06	84.24	93.06	84.24	4000	186.12	168.49	60.00	-

Berdasarkan tabel 4,5 dan 6, penggunaan sistem isolasi dasar (LRB dan FPS) secara signifikan mengurangi simpangan antar lantai dibandingkan struktur fixed base. Pada arah X, FPS menurunkan simpangan hingga 75% dan LRB 71%, sedangkan pada arah Y masing-masing 64% dan 63%. Hal ini membuktikan bahwa isolasi dasar efektif meningkatkan performa seismik dengan membatasi deformasi antar lantai.



Gambar 3. Grafik Perbandingan Simpangan Antar Tingkat Antara Fix base, LRB dan FPS arah X dan Y

3.5 Perbandingan *Story Displacement*

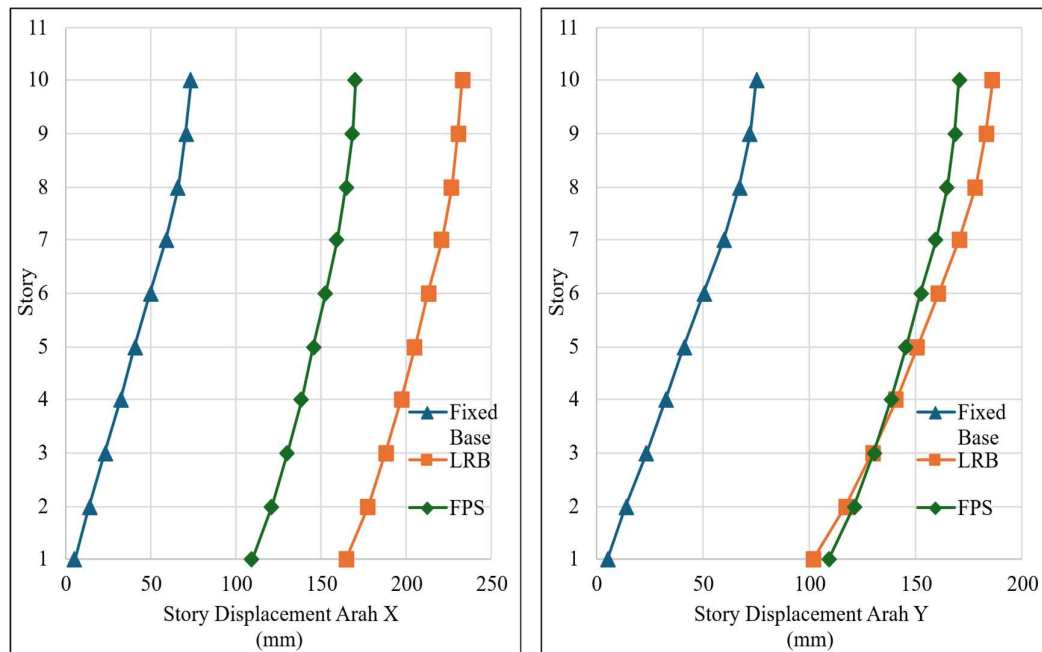
Tabel 7. Perbandingan *Story Displacement* Arah X

Story	Story Displacement Arah X			Perbandingan	
	FB	LRB	FPS	FB / LRB	FB / FPS
	δe_X (mm)	δe_X (mm)	δe_X (mm)	Arah X	Arah X
10	73.5	232.6	170.1	217%	132%
9	70.6	230.4	168.1	226%	138%
8	65.8	226.4	164.6	244%	150%
7	58.6	220.5	159.3	276%	172%
6	49.7	212.9	152.4	329%	207%
5	40.6	204.8	145.2	405%	258%
4	32.1	196.9	138.1	514%	331%
3	23.0	187.9	130.1	715%	465%
2	13.7	177.5	120.8	1195%	781%
1	4.9	164.4	109.0	3222%	2103%

Tabel 8. Perbandingan *Story Displacement* Arah Y

Story	<i>Story Displacement Arah Y</i>			Perbandingan	
	FB	LRB	FPS	FB / LRB	FB / FPS
	δeY (mm)	δeY (mm)	δeY (mm)	Arah Y	Arah Y
10	85.9	314.8	185.9	266%	116%
9	82.6	303.6	183.0	268%	122%
8	76.8	289.7	177.9	277%	132%
7	68.3	272.8	170.3	299%	149%
6	57.8	253.2	160.6	338%	178%
5	47.2	233.2	150.5	394%	219%
4	37.2	213.5	140.6	474%	278%
3	26.7	192.5	129.5	621%	385%
2	15.8	169.7	116.9	973%	639%
1	5.7	143.8	101.5	2428%	1685%

Berdasarkan tabel, sistem isolasi dasar (LRB dan FPS) menyebabkan peningkatan signifikan pada simpangan total struktur dibandingkan *fixed base*, baik pada arah X maupun Y. Pada arah X, peningkatan maksimum mencapai 3222% untuk LRB dan 2103% untuk FPS, sedangkan pada arah Y mencapai 2894% untuk LRB dan 1948% untuk FPS. Peningkatan terbesar terjadi di lantai bawah akibat pergerakan isolator. LRB menunjukkan simpangan lebih besar dari FPS, menandakan bahwa LRB lebih fleksibel, sedangkan FPS lebih kaku namun tetap efektif dalam meredam gaya gempa.



Gambar 4. Grafik Perbandingan *Story Displacement* Antara Fix Base, LRB dan FPS

3.5 Perbandingan Gaya Geser Dasar

Untuk menilai kontribusi isolator dalam mereduksi beban gempa, dilakukan perbandingan nilai gaya geser dasar antara model base isolation dan *fixed base* pada kondisi pembebanan seismik yang sama.

Tabel 9. Komparasi Gaya Geser Dasar

Gaya Geser	Tipe Perletakan			Perbandingan	
	FB	LRB	FPS	FB / LRB	FB / FPS
Gaya Geser Arah X (kN)	10368.39	5200.76	5660.56	50.2%	54.6%
Gaya Geser Arah Y (kN)	10858.76	5200.76	5660.56	47.9%	52.1%

Berdasarkan Tabel diatas, terlihat bahwa nilai gaya geser dasar pada struktur dengan isolasi dasar (LRB dan FPS) jauh lebih kecil dibandingkan dengan struktur fixed base (FB). Nilai gaya geser dasar untuk struktur LRB sekitar 54,6% kali lebih kecil dari fixed base (FB), sedangkan untuk struktur FPS sekitar 52,1% kali lebih kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem isolasi dasar mampu mengurangi respons seismik struktur secara efektif, sehingga potensi kerusakan akibat gempa dapat diminimalkan dibandingkan dengan struktur tanpa isolasi.

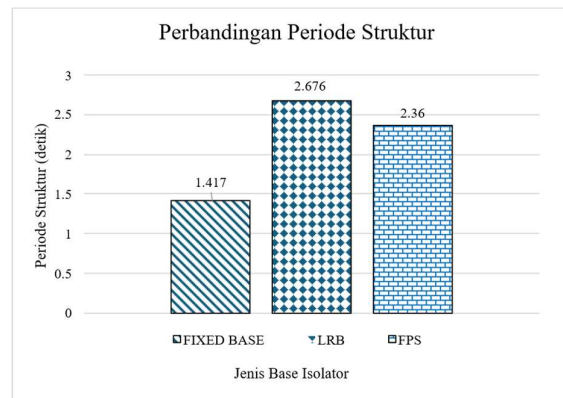
3.6 Perbandingan Periode Struktur

Tujuan perbandingan ini adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan sistem isolasi dasar terhadap perubahan kekakuan dan periode getar struktur, baik pada struktur *fixed base* maupun pada struktur dengan sistem *isolated base* (LRB dan FPS).

Tabel 10. Perbandingan Periode Struktur *Fix Base*, LRB dan FPS

Mode	Periode (detik)			Δ (%)	
	FB	LRB	FPS	FB / LRB	FB / FPS
1	1.417	2.676	2.36	89%	67%
2	1.353	2.497	2.113	85%	56%
3	1.192	1.821	1.858	53%	56%
4	0.506	0.705	0.69	39%	36%
5	0.483	0.682	0.644	41%	33%
6	0.427	0.603	0.598	41%	40%
7	0.27	0.345	0.345	28%	28%
8	0.257	0.335	0.327	30%	27%
9	0.228	0.31	0.299	36%	31%
10	0.182	0.219	0.221	20%	21%
11	0.173	0.214	0.211	24%	22%

Berdasarkan Tabel diatas, dapat disimpulkan bahwa penggunaan sistem isolasi dasar (LRB dan FPS) menyebabkan peningkatan periode getar struktur dibandingkan dengan struktur *fixed base* (FB). Peningkatan terbesar terjadi pada mode pertama, yaitu sebesar 89% untuk LRB dan 67% untuk FPS,

**Gambar 5.** Grafik Perbandingan Periode Struktur *Fix Base*, LRB dan FPS

menunjukkan bahwa sistem isolasi dasar secara signifikan menurunkan kekakuan efektif struktur. Seiring bertambahnya mode getar, selisih periode antara struktur *fixed base* dan struktur dengan isolasi dasar semakin kecil, yang menandakan bahwa pengaruh isolasi lebih dominan pada mode-mode rendah yang mewakili gerakan global bangunan.

4. Kesimpulan

Kesimpulan dari hasil studi komparasi penggunaan *base isolation* tipe LRB dan FPS pada struktur *high rise building* beton bertulang adalah sebagai berikut:

1. Hasil analisis batas simpangan antar lantai menunjukkan bahwa sistem LRB dan FPS secara signifikan menurunkan simpangan antar lantai dibandingkan sistem *fixed base*. FPS menurunkan simpangan hingga 75% (arah X) dan 64% (arah Y), sedangkan LRB menurunkan hingga 71% (arah X) dan 63% (arah Y). Artinya, isolasi dasar efektif meningkatkan performa seismik bangunan.
2. Sistem isolasi dasar menyebabkan peningkatan signifikan pada simpangan total struktur dibandingkan *fixed base*. Pada arah X, peningkatan maksimum mencapai 3222% untuk LRB dan 2103% untuk FPS, sedangkan pada arah Y mencapai 2894% untuk LRB dan 1948% untuk FPS. Hal ini disebabkan pergerakan isolator di dasar bangunan. LRB lebih fleksibel dibanding FPS, namun keduanya efektif mereduksi percepatan struktur atas dan mengurangi potensi kerusakan.
3. Nilai gaya geser dasar struktur berisolasi jauh lebih besar dibandingkan struktur *fixed base*. Untuk arah X dan Y, gaya geser dasar struktur LRB sekitar 54,6% kali lebih kecil, sedangkan FPS 52,1% kali lebih besar dari *fixed base*. Hal ini menunjukkan bahwa sistem isolasi dasar mampu mengurangi respons seismik struktur secara efektif, sehingga potensi kerusakan akibat gempa dapat diminimalkan dibandingkan dengan struktur tanpa isolasi.
4. Penggunaan sistem isolasi dasar (LRB dan FPS) meningkatkan periode getar struktur dibandingkan struktur *fixed base* (FB). Peningkatan terbesar terjadi pada mode pertama, yaitu 89% untuk LRB dan 67% untuk FPS, yang menunjukkan penurunan kekakuan struktur akibat isolasi. Pengaruh isolasi lebih dominan pada mode-mode rendah yang merepresentasikan gerakan global bangunan.

5. Daftar Pustaka

- [1] A. Alwani and C. F. Adiarto, "Bangunan Tinggi Di Indonesia Yang Dirancang Tahan Gempa," *J. Econ. Bus. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 105–112, 2021, doi: 10.32500/jebe.v3i1.2053.
- [2] M. Yuliyanti, R. K. Natalia, C. P. Pradani, D. Anggraeni, S. P. Astuti, and I. F. Setyaningrum, "Earthquake Disaster Mitigation Strategy : Lessons Learned from Indonesia," pp. 1465–1472, 2019.
- [3] R. Trimurtiningrum, G. Sarya, H. Widhiarto, H. W. Rohaniawan, and M. H. Masruri, "Analisis Kinerja Gedung Beton Bertulang Dengan Variasi Penempatan Dinding Geser Terhadap Beban Gempa," *Axial J. Rekayasa Dan Manaj. Konstr.*, vol. 11, no. 2, p. 061, 2023, doi: 10.30742/axial.v11i3.3255.
- [4] Imad Shakir, Mohammed Ahmed Jasim, and Sardasht S. Weli, "High Rise Buildings: Design, Analysis, and Safety," *Int. J. Archit. Eng. Technol.*, vol. 8, no. March, pp. 1–13, 2021, doi: 10.15377/2409-9821.2021.08.1.
- [5] A. Di Egidio, S. Pagliaro, C. Fabrizio, and A. M. de Leo, "Seismic performance of frame structures coupled with an external rocking wall," *Eng. Struct.*, vol. 224, no. December 2019, p. 111207, 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111207.
- [6] A. De Luca and L. G. Guidi, "State of art in the worldwide evolution of base isolation design," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 125, no. September 2018, p. 105722, 2019, doi: 10.1016/j.soildyn.2019.105722.
- [7] Y. Lu *et al.*, "Simplified procedures for seismic design verification and evaluation of lead rubber bearing base-isolated buildings based on free-vibration response," *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, vol. 29, no. 12, pp. 1–16, 2020, doi: 10.1002/tal.1751.
- [8] A. Ziraoui, B. Kissi, H. Aaya, and I. Azdine, "Seismic behavior of base-isolated building structures with lead rubber bearings (LRBs)," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 61, no. 2023, pp. 171–179, 2024, doi: 10.1016/j.prostr.2024.06.023.
- [9] B. Arian, Tavio, and D. Iranata, *Studi Efektifitas Aplikasi Lrb Pada Modifikasi Struktur Gedung The Alton Apartment (Tower 3) 15 Lantai Dengan Metode Pracetak*, no. Tower 3. 2021.
- [10] M. R. Shiravand, H. Ketabdari, and M. Rasouli, "Optimum arrangement investigation of LRB and FPS isolators for seismic response control in irregular buildings," *Structures*, vol. 39, pp. 1031–1044, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.070>.

- [11] C. A. Barrera-Vargas, I. M. Díaz, J. M. Soria, and J. H. García-Palacios, “Enhancing friction pendulum isolation systems using passive and semi-active dampers,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 16, 2020, doi: 10.3390/app10165621.
- [12] N. Makris, “Seismic isolation: Early history,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 48, no. 2, pp. 269–283, 2019, doi: 10.1002/eqe.3124.
- [13] F. A. Suryawinata, T. F. Tirtosugondo, G. Ghewa, D. Widiyanto, and D. Hartanto, “Pengaruh Penggunaan High Damper Rubber Bearing Pada Gedung Bertingkat Ditinjau Terhadap Level Kinerja Struktur Dengan Metode Analisis Time History (Studi Kasus: Pembangunan Gedung Hotel),” *G-Smart*, vol. 6, no. 2, pp. 82–93, 2023, doi: 10.24167/gsmart.v6i2.4466.
- [14] K. H. Gupta, “Seismic Base Isolation For Earthquake Resistant Structure,” vol. 7, no. 3, pp. 36–46, 2019.
- [15] A. Syarif, B. Piscesa, and H. Sugihardjo, *Modifikasi Perencanaan Office Tower Olive Dengan Base Isolator Tipe Friction Pendulum System (Fps) Dan Terletak Di Jayapura*. 2020.
- [16] N. and Kelly, “Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice,” *Earthq. Spectra*, vol. 16, no. 3, 1999, [Online]. Available: <http://earthquakespectra.org/doi/abs/10.1193/1.1586135>