

Modifikasi Perencanaan Rumah Susun Pasar Rebo dengan Base Isolation Tipe Friction Pendulum System pada Daerah Rawan Gempa

Muhamad Fauzan Akbari, Hidajat Sugihardjo, dan Ahmad Basshofi Habieb
Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: hidayat@ce.its.ac.id

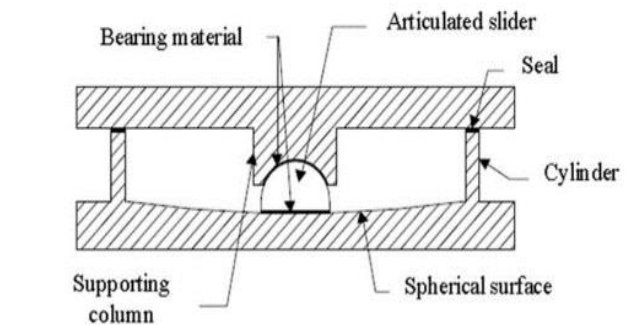
Abstrak—Tingginya aktivitas seismik dan potensi gempa menuntut perencanaan struktur gedung dengan kinerja yang baik saat gempa terjadi. Tipe penahan gempa konvensional seperti sistem rangka pemikul momen dan shearwall pada struktur bangunan dapat menyebabkan kerusakan elemen struktural maupun non-struktural yang signifikan akibat adanya plastifikasi dan tingginya percepatan lantai. Oleh karena itu diperlukan suatu sistem penahan gempa yang lebih efektif dalam mencegah dampak kerusakan tersebut. Inovasi yang dikembangkan untuk mengurangi dampak tersebut adalah base isolation. Konsep dasar base isolation yaitu memisahkan pergerakan struktur dari pergerakan horizontal tanah dengan memasang elemen fleksibel di dasar bangunan sehingga gaya gempa yang masuk pada struktur tereduksi. Dalam tugas akhir ini akan dilakukan modifikasi perencanaan gedung Rumah Susun Pasar Rebo dengan menggunakan base isolation tipe friction pendulum system (FPS). Perencanaan tersebut mengacu beberapa peraturan yaitu SNI 2847:2019, SNI 1726:2019, SNI 1727:2020, PPIUG 1983 dan peraturan lainnya. Dari analisis perhitungan didapatkan: tebal pelat lantai terbesar 13cm, dimensi balok anak 25x40cm, dimensi balok induk terbesar 45x70cm, dimensi kolom terbesar 60x80cm, dan pondasi direncanakan dengan spun pile 40x40 dan D60 dengan kedalaman masing-masing 14 dan 11m. Friction pendulum yang digunakan pada gedung ini ada dua tipe yaitu SIP-D-HF-325 (5000) dan SIP-D-HF-326 (5000) yang merupakan produk dari Maurer. Selain itu dari analisis didapatkan struktur base isolation memiliki periode 3,17 kali lebih besar dari periode struktur fixed based. Struktur base isolation memiliki gaya geser dasar yang lebih kecil dari struktur fixed based dengan sistem SRPMM ($R=5$), SRPMB ($R=3$), SRPMB ($R=2$) dengan selisih masing-masing sebesar 6,23% , 43,4%, dan 62,49%. Akan tetapi struktur base isolation memiliki gaya geser yang lebih besar dari struktur SRPMK dengan selisih sebesar 50,03%. Struktur dengan base isolation memiliki perpindahan atap yang lebih besar dari struktur fixed based. Penggunaan base isolation pada struktur mereduksi drift rasio dengan selisih rata-rata 68,2% diarah X dan 47,35% diarah Y.

Kata Kunci—Friction Pendulum System, Base Isolation, Struktur Tahan Gempa.

I. PENDAHULUAN

INDONESIA merupakan negara yang rawan gempa. Berdasarkan data BMKG sedikitnya terjadi 621 kejadian gempa di wilayah Indonesia dalam bulan Oktober 2020. Selain itu penemuan sesar aktif baru yang ikut melatarbelakangi peningkatan koefisien gempa pada SNI 1726:2019 mengindikasikan adanya peningkatan aktivitas seismik.

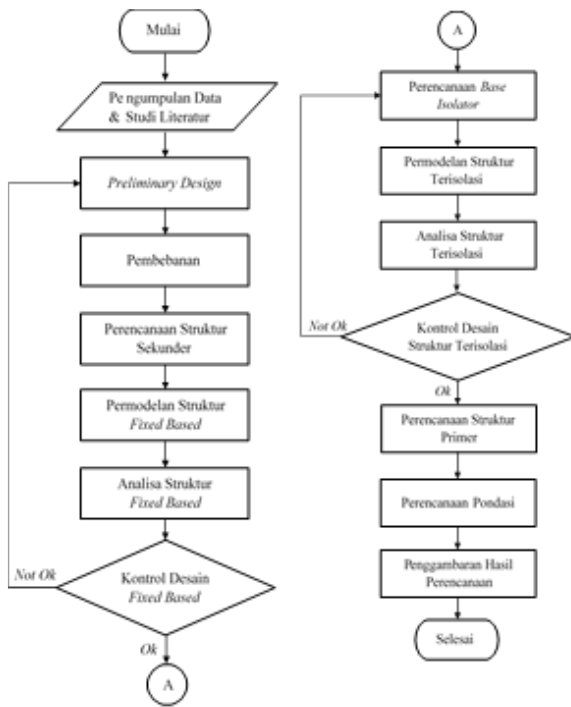
Tingginya aktivitas seismik dan potensi gempa menuntut perencanaan struktur gedung dengan kinerja yang baik saat gempa terjadi. Tipe penahan gempa yang umum digunakan seperti sistem rangka pemikul momen dan shearwall dapat



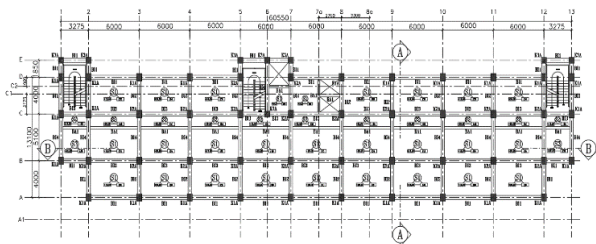
Gambar 1. Ilustrasi friction pendulum system.

menyebabkan kerusakan elemen struktural maupun nonstruktural yang signifikan akibat plastifikasi dan tingginya percepatan lantai yang tentunya dapat bermasalah pada bangunan yang dituntut untuk tetap beroperasi dengan baik pasca gempa terjadi. Salah satu konsep yang digunakan untuk mengurangi dampak tersebut adalah sistem *base isolation*. Konsep utama dari sistem ini adalah memisahkan pergerakan struktur dari tanah dengan memasang elemen fleksibel di atas pondasi yang dapat meningkatkan periode dan redaman struktur sehingga gaya gempa yang masuk ke dalam gedung tereduksi [1]. Penggunaan sistem *base isolation* dapat meminimalisir *interstory drift* dan mengurangi percepatan lantai akibat gempa karena perilaku struktur di atasnya yang berdeformasi sebagai *rigid body* sehingga dapat meminimalisir kerusakan pada elemen struktural maupun non-struktural [2]. Secara umum terdapat beberapa jenis *base isolation* yaitu: (1) *Laminated Rubber (Elastomeric) Bearing*, (2) *Lead Rubber Bearing (LRB)*, (3) *High Damping Rubber Bearing (HDRB)*, (4) *Friction Pendulum System (FPS)*. Menurut Wang, Yen-Po (2002), FPS memiliki keunggulan dari tipe *elastomeric bearing* lainnya, yaitu: Memiliki kekuatan dan stabilitas yang melebihi *elastomeric bearing*, sifat propertinya tidak dipengaruhi oleh umur dan temperatur, dan biaya instalasi yang lebih murah.

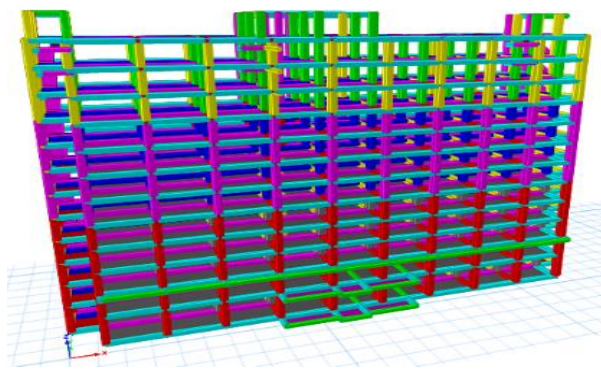
Melihat latar belakang yang ada, serta minimnya penggunaan *base isolation* pada gedung di Indonesia, maka dilakukan analisis penggunaan *base isolator* tipe *friction pendulum system* (FPS) pada gedung bertingkat di zona gempa rawan gempa sehingga dapat diketahui karakter struktur yang menggunakan tipe *base isolation* ini. Objek studi pada tugas akhir ini adalah gedung Rusun Pasar Rebo Tower A di Jakarta yang memiliki 13 lantai dengan sistem penahan gempa berupa sistem pemikul momen dan shearwall. Pada tugas akhir ini direncanakan modifikasi gedung tersebut dengan mengubah sistem penahan gempanya menjadi sistem *base isolation* tipe *friction pendulum system*.



Gambar 2. Bagan alir penyelesaian tugas akhir.



Gambar 3. Denah lantai struktur.



Gambar 4. Permodelan ETABS 3D struktur rich palace Surabaya.

A. Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dari pembahasan ini antara lain adalah:

1. Merencanakan struktur sekunder yaitu balok anak, pelat, tangga, dan lift.
2. Merencanakan struktur primer yaitu kolom dan balok.
3. Merencanakan base isolator tipe FPS.
4. Mengetahui perbandingan perilaku struktur dengan fixed-base dan base isolation tipe FPS.
5. Merencanakan pondasi struktur.
6. Menuangkan hasil perencanaan tiap elemen bangunan kedalam gambar teknik.

B. Batasan Masalah

Pada pembahasan ini, masalah dibatasi antara lain:

Tabel 1.
Rekapitulasi perhitungan pelat lantai

Lantai	Tipe	Jenis	tebal (cm)	Tulangan arah pendek	Tulangan arah panjang
Lt Dasar-Lt 11	S1	2 arah	13	D10-150	D10-150
	S2	1 arah	10	D10-200	D10-450
	S3	2 arah	12	D10-350	D10-450
	S4	rangkap	10	D10-350	D10-450
L. Basement	S1	2 arah	13	D10-150	D10-150

Tabel 2.
Rekapitulasi perhitungan balok anak

Tipe	Panjang (m)	Dimensi (cm)	Tulangan				
			Tumpuan		Lapangan		
			Atas	Bawah	Atas	Bawah	
BA1	6	25x40	2D16	2D16	2D16	3D16	D10-100
BA2	4	25x40	5D25	3D25	2D25	3D25	D10-100

Tabel 3.
Rekapitulasi perhitungan Balok Lift

Tipe	Panjang (m)	Dimensi (cm)	Tulangan				Sengkang
			Tumpuan		Lapangan		
			Atas	Bawah	Atas	Bawah	
BG	2	25x40	2D19	2D19	2D19	3D19	D10-150
BT	2,7	25x40	2D25	2D25	2D25	3D25	D10-150

Tabel 4.
Dimensi 2 tipe tangga

Dimensi	Tipe I	Tipe 2
Tinggi Antar Lantai (cm)	400	320
Tinggi Bordes (cm)	200	160
Panjang Bentang (cm)	585	585
Panjang Bordes (cm)	235	235
Panjang Tangga (cm)	280	270
Lebar Injakan (cm)	28	30
Tinggi Tanjakan (cm)	18,2	16

Tabel 5.
Rekapitulasi hasil perencanaan tangga

Hasil Perencanaan	Tipe I	Tipe 2
Tebal pelat (cm)	20	20
Tulangan lentur utama (atas)	D13-100	D13-100
Tulangan lentur utama (bawah)	D13-120	D13-200
Tulangan melintang (atas)	D10-200	D10-200
Tulangan melintang (bawah)	D10-200	D10-200

Tabel 6.
Rekapitulasi kontrol perhitungan manual dengan ETABS

Kombinasi Beban	Manual (kN)	Etabs (kN)
D+SDL	132740,9	132177,36
Live	48931,74	47428,88
Total	181672,65	179606,25

1. Tidak merencanakan metode pelaksanaan, manajemen kontruksi, dan perhitungan analisa biaya.
2. Tidak merencanakan elemen arsitektural, mekanikal, dan elektrik.

C. Manfaat

Manfaat dari tugas akhir ini antara lain:

1. Dapat menjadi pertimbangan penggunaan *base isolator* tipe *friction pendulum system* sebagai sistem penahan gempa pada bangunan di Indonesia.
2. Dapat menjadi referensi bagi pembaca tentang perencanaan gedung tahan gempa dengan sistem *base isolation* tipe *friction pendulum system*.

Tabel 7.
Rekapitulasi kontrol partisipasi massa

Modal	Sum UX	Sum UY
...
6	0,895	0,884
7	0,929	0,884
8	0,929	0,921

Tabel 8.
Rekapitulasi kontrol simpangan struktur

Lantai	Drift X	Drift Y	Δx (mm)	Δy (mm)	Δ_{max} (mm)	Status
Top Atap	34,92	33,77	5,219	5,219	64	Ok
Lt Atap	33,971	32,605	4,73	4,73	64	Ok
11	33,111	31,172	7,205	7,205	64	Ok
10	31,801	29,374	9,746	9,746	64	Ok
9	30,029	27,211	12,134	12,134	64	Ok
8	27,822	24,721	14,327	14,327	64	Ok
7	25,217	21,954	16,296	16,296	64	Ok
6	22,254	18,957	18,04	18,04	64	Ok
5	18,974	15,779	19,459	19,459	64	Ok
4	15,436	12,493	20,653	20,653	64	Ok
3	11,681	9,133	21,483	21,483	64	Ok
2	7,775	5,773	21,714	21,714	64	Ok
1	3,827	2,599	21,048	21,048	80	Ok
GF	0,00	0,00	0	0	0	Ok

Tabel 9.
Rekapitulasi kontrol pengaruh p-delta

Lantai	Rasio Stabilitas Arah X	Rasio Stabilitas Arah Y	Rasio Stabilitas Maksimum	Status
Top Atap	0,0008	0,0009	0,0909	Ok
Lt Atap	0,0008	0,0013	0,0909	Ok
11	0,0012	0,0017	0,0909	Ok
10	0,0017	0,0021	0,0909	Ok
9	0,0022	0,0025	0,0909	Ok
8	0,0028	0,0029	0,0909	Ok
7	0,0033	0,0034	0,0909	Ok
6	0,0038	0,0037	0,0909	Ok
5	0,0043	0,0041	0,0909	Ok
4	0,0049	0,0044	0,0909	Ok
3	0,0054	0,0047	0,0909	Ok
2	0,0058	0,0048	0,0909	Ok
1	0,0049	0,0034	0,0909	Ok
GF	0,0000	0,0000	0,0909	Ok

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Konsep Isolasi Seismik

Isolasi seismik adalah metode perlindungan bangunan dari gempa dengan menyisipkan perletakkan fleksibel (*base isolator*) diantara pondasi dan dasar bangunan yang mampu memisahkan struktur bangunan dari pergerakan horizontal tanah sehingga dapat mereduksi gaya gempa yang masuk pada bangunan [3]. Tujuan utama dari penerapan sistem ini adalah untuk meningkatkan kinerja struktur bangunan terhadap gempa dan mencegah kerusakan pada struktur akibat kemungkinan plastifikasi pada elemen struktural,

Tabel 10.
Rekapitulasi kontrol ketidakteraturan torsi

Lantai	Max Drift Avg Drift Arah X	Max Drift Avg Drift Arah Y	Rasio < 1,2
Top Atap	1,025	1,11	Ok
Lt Atap	1,015	1,103	Ok
11	1,013	1,102	Ok
10	1,013	1,1	Ok
9	1,012	1,1	Ok
8	1,011	1,099	Ok
7	1,01	1,099	Ok
6	1,009	1,098	Ok
5	1,009	1,098	Ok
4	1,008	1,098	Ok
3	1,008	1,099	Ok
2	1,009	1,106	Ok
1	1,028	1,128	Ok
GF	1,025	1,11	Ok

Tabel 11.
Target properti sistem isolasi

Target Properti Sistem	Nilai
Periode struktur terisolasi, T_M (s)	3,6
Redaman efektif, β_M (%)	25%
Faktor redaman, B_M	1,6
Perpindahan maksimum, D_M (mm)	431,4
kekakuan minimum sistem, K_{Min} (kN/m)	45461,59
kekakuan maksimum sistem, K_{Max} (kN/m)	50007,75

Tabel 12.
Rekapitulasi perencanaan tiap tipe FPS

Parameter	P1	P2
Jari-jari, R (m)	5	5
Kekakuan efektif, K_{eff} (kN/m)	648,031	1141,521
Redaman efektif, β_M (%)	24,59	24,59
Perpindahan maksimum, D_M (mm)	431,4	431,4
Jumlah isolator, n	36	18
Beban vertikal gravitasi max, N_{Sd} (kN)	2500	4000
Beban vertikal gempa max, N_{Ed} (kN)	8500	14400

Tabel 13.
Target properti sistem isolasi

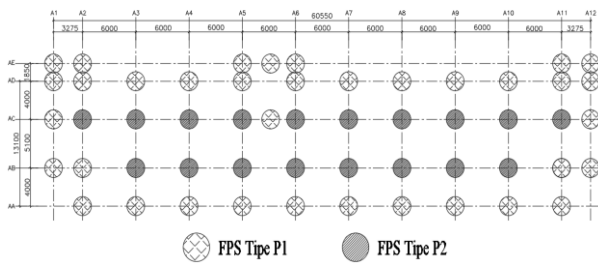
Properti	Hasil	Target
Periode struktur terisolasi, T_M (s)	3,664	3,6
Redaman efektif, β_M (%)	24,78%	25%
Faktor redaman, B_M	1,59	1,6
Perpindahan maksimum, D_M (mm)	440	431,4
kekakuan minimum sistem, K_{Min} (kN/m)	43876,53	45461,59
kekakuan maksimum sistem, K_{Max} (kN/m)	47164,18	50007,75

dengan meningkatkan periode alami dan redaman struktur secara signifikan [4]. Peningkatan periode dan redaman struktur dapat mengurangi gaya geser dasar pada struktur. Peningkatan periode alami akan menyebabkan struktur memiliki frekuensi yang relatif lebih rendah dari frekuensi struktur *fixed-base* serta frekuensi dominan pergerakan tanah, hal tersebut dapat mengurangi deformasi dan percepatan pada struktur secara signifikan [5].

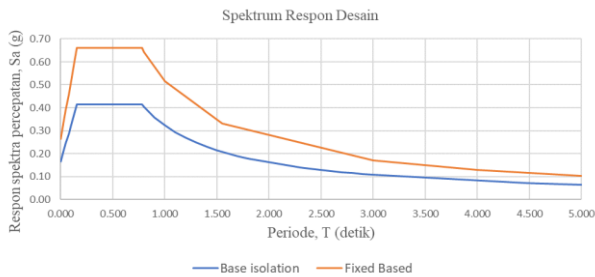
B. Konsep Isolasi Seismik Friction Pendulum System

FPS tersusun dari *spherical surface* konkaf yang memiliki radius kelengkungan dan *articulated slider* yang dilapisi dengan lapisan teflon yang memiliki koefisien gesek tertentu dengan *spherical surface* tersebut [6]. Ilustrasi komponen FPS terdapat pada Gambar 1.

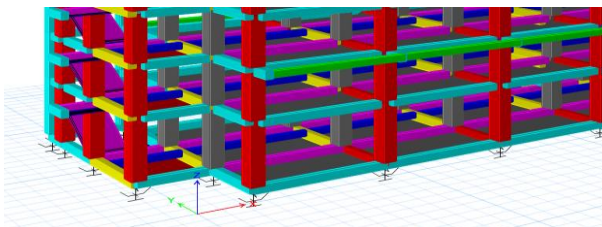
Bentuk pelat baja yang cekung menyebabkan struktur bergerak layaknya pendulum saat gempa terjadi, sehingga setelah gempa berhenti struktur akan beresilasi dengan



Gambar 5. Denah pemasangan FPS.



Gambar 6. Respon spektrum isolated structure dan fixed based structure.



Gambar 7. Permodelan perletakkan base isolator pada ETABS.

amplitudo yang terus mengecil hingga akhirnya kembali keposisi semula [7]. Pergerakan tersebut akan meningkatkan periode struktur dan *displacement*, sehingga mekanisme disipasi gempa bisa terjadi. Selama pergerakan tersebut terjadi, koefisien gesek dari permukaan baja dengan *slider* akan bekerja sebagai redaman sehingga gaya gempa yang masuk dapat tereduksi [6].

III. METODOLOGI

Urutan penyelesaian tugas akhir dapat dilihat pada bagan alir Gambar 2.

Pada perencanaan ini, gedung akan dimodifikasi dengan kriteria sebagai berikut:

- Nama Gedung : Rumah Susun Pasar Rebo (Tower A)
- Alamat : Kec. Ciracas, Kota Jakarta Timur
- Lokasi : Jakarta Timur
- Fungsi : Rumah Susun
- Jumlah Lantai : 13 Lantai
- Tinggi : ±42,4 m
- Struktur Utama : Beton bertulang
- Sistem Struktur : *Base isolation tipe friction pendulum*
- Mutu Beton : $f'c$ 30 MPa & $f'c$ 35 MPa
- Mutu tulangan : 400 MPa (BJTD 40)

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perencanaan Struktur Sekunder

1) Perencanaan Pelat Lantai

Perencanaan pelat menggunakan metode koefisien PBI dan material beton dan baja yang digunakan masing-masing yaitu

Tabel 14
Target properti sistem isolasi

Modal	Sum UX	Sum UY
1	0,933	0,025
2	0,964	0,986
3	0,998	0,998
...

Tabel 15.

Rekapitulasi kontrol simpangan struktur terisolasi

Lantai	Drift X (mm)	Drift Y (mm)	Δx (mm)	Δy (mm)	Δ_{max} (mm)	Status
Top	-	2,037	-9,056	4,074	48	
Atap	4,528					Ok
Lt Atap	0,531	1,553	1,062	3,106	48	Ok
11	1,425	1,978	2,85	3,956	48	Ok
10	1,974	2,408	3,948	4,816	48	Ok
9	2,532	2,833	5,064	5,666	48	Ok
8	3,094	3,237	6,188	6,474	48	Ok
7	3,656	3,626	7,312	7,252	48	Ok
6	4,217	4,007	8,434	8,014	48	Ok
5	4,765	4,346	9,53	8,692	48	Ok
4	5,34	4,677	10,68	9,354	48	Ok
3	6,358	5,245	12,716	10,49	48	Ok
2	6,188	5,678	12,376	11,356	48	Ok
1	9,576	7,621	19,152	15,242	60	Ok
GF	0	0	0	0	48	Ok

Tabel 16.

Rekapitulasi kontrol pengaruh p-delta

Lantai	Rasio Stabilitas Arah X	Rasio Stabilitas Arah Y	Rasio Stabilitas Maksimum	Status
Top Atap	-0,010	0,0045	0,250	Ok
Lt Atap	0,001	0,0038	0,250	Ok
11	0,004	0,0050	0,250	Ok
10	0,005	0,0064	0,250	Ok
9	0,007	0,0079	0,250	Ok
8	0,009	0,0095	0,250	Ok
7	0,011	0,0112	0,250	Ok
6	0,014	0,0130	0,250	Ok
5	0,016	0,0149	0,250	Ok
4	0,019	0,0170	0,250	Ok
3	0,024	0,0203	0,250	Ok
2	0,025	0,0236	0,250	Ok
1	0,033	0,0274	0,250	Ok
GF	0,000	0,0000	0,250	Ok

30 MPa dan 400 MPa, digunakan cover 20 mm. Rekapitulasi perhitungan pelat tersaji pada Tabel 1. Untuk lantai 12 dan atap digunakan jenis pelat rangkap untuk semua tipe pelat agar lebih tahan terhadap paparan lingkungan.

2) Perencanaan Balok Anak

Balon anak direncanakan menjadi 2 tipe dengan material beton dan baja masing-masing 30 MPa dan 400 MPa. Digunakan cover 40 mm. Rekapitulasi hasil perencanaan balok anak dapat dilihat pada Tabel 2.

3) Perencanaan Balok lift

Lift direncanakan menggunakan lift penumpang dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Tipe Lift : *Passenger Elevators*
- Merek : Hyundai
- Kapasitas : 10 Orang/800 kg
- Lebar Pintu : 800 mm

Balon lift direncanakan menjadi 2 tipe yaitu BG (balok gantung) dan BT (balok tumpu), dengan material beton dan baja masing-masing 30 MPa dan 400 MPa. Digunakan cover

Tabel 17.
Simpangan tiap base isolator

Join	Tipe FPS	Perpindahan arah X (mm)	Perpindahan arah Y (mm)
1	P 1	315,89	344,85
2	P 1	315,89	332,45
3	P 1	315,88	320,51
4	P 1	315,86	309,09
5	P 1	315,84	298,27
6	P 1	315,84	305,97
...
49	P 1	289,39	345,00
50	P 1	290,41	309,07
51	P 1	290,42	303,18
52	P 1	290,42	298,24
53	P 1	289,57	391,66
54	P 1	289,55	403,89
Nilai Max		315,89	403,93

Tabel 18.
Rekapitulasi perhitungan balok induk

Tipe	Dimensi (cm)	Tulangan					Sengkang
		Tumpuan		Lapangan		Tengah	
		Atas	Bawah	Atas	Bawah		
BI1	45x70	6D29	5D29	3D29	3D29	4D16	2D13-200
BI2	40x60	5D29	4D29	3D29	3D29	2D16	2D13-150
BI3	40x60	5D29	3D29	3D29	3D29	2D16	2D13-150
BI4	40x60	4D29	3D29	3D29	3D29	2D16	2D13-150
BI5	30x50	3D25	2D29	2D25	2D25	2D16	2D13-150

Tabel 19.
Rekapitulasi perhitungan kolom

Tipe	Dimensi (cm)	Tulangan Longitudinal	Sengkang
K1A	60x80	24D29	4D13-250
K1B	60x80	20D25	4D13-250
K1C	60x80	12D25	4D13-250
K2A	60x80	24D29	4D13-250
K2B	60x80	20D25	4D13-250
K2C	60x80	12D25	4D13-250
K3A	60x60	20D29	3D13-200
K3B	50x50	12D25	3D13-200
K3C	50x50	8D25	3D13-200

40 mm. Rekapitulasi hasil perencanaan alok *lift* dapat dilihat pada Tabel 3.

4) Perencanaan Tangga

Pada gedung ini terdapat 2 jenis tangga sesuai Tabel 4. Perencanaan tangga mengasumsikan perletakan sendi dan rol. Hasil perencanaan tangga dapat dilihat pada Tabel 5 (Gambar 3).

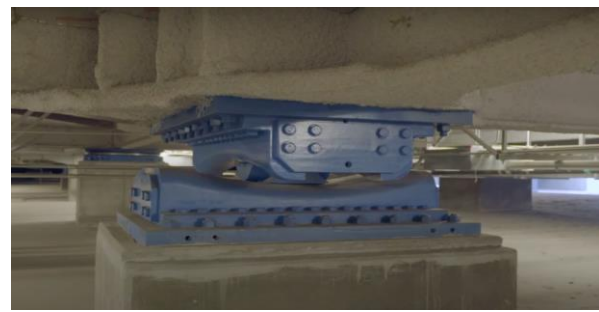
B. Permodelan Struktur Fixed Based

Permodelan struktur dilakukan menggunakan program bantu ETABS 2016. Untuk denah dari struktur gedung dapat dilihat pada Gambar 2. Kemudian dari denah tersebut permodelan 3 dimensi dibuat dalam program ETABS yang dapat dilihat pada Gambar 4.

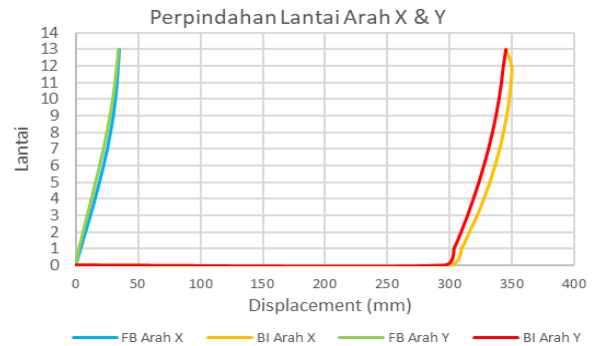
1) Pembebanan

Pembebanan pada struktur gedung rumah susun Pasar Rebo adalah sebagai berikut:

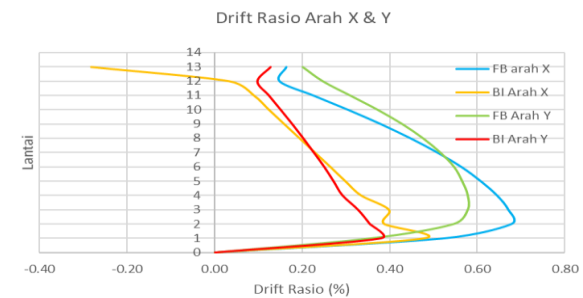
- Beban mati
- Pelat S1 : 291 kg/m²
- Pelat S2 : 213 kg/m²
- Pelat S3 : 333 kg/m²
- Pelat S4 : 91 kg/m²
- Berat beton : Dihitung Langsung ETABS



Gambar 8. FPS anti cabut.



Gambar 9. Perpindahan lantai atap struktur FB dan BI akibat gempa kobe.



Gambar 10. Perbandingan drift rasio struktur fixed based & terisolasi.

Beban Hidup

- Lantai : 479 kg/m²
- Atap : 479 kg/m²

Beban Angin

Beban Gempa

Perhitungan beban gempa mengacu pada Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa SNI 1726:2019 dan SNI 1727:2019.

2) Kombinasi Pembebanan

Kombinasi pembebanan yang digunakan sesuai dengan SNI 1726:2019 Ps. 4.2.2 sebagai berikut:

- 1.4D
- 1,2D + 1,6L + 0,5 (L_r atau R)
- 1,2D + 1,6 (L_r atau R) + (L atau 0,5W)
- 1,2D + 1,0W + L + 0,5 (L_r atau R)
- 0,9D + 1,0W
- 1,2D + E_v+ E_h+ L
- 0,9D - E_v+ E_h

C. Kontrol Desain

1) Kontrol Berat Hasil Perhitungan Manual

Rekapitulasi kontrol perhitungan manual dengan ETABS disajikan pada Tabel 6. Dari perhitungan didapatkan selisih berat manual dan Etabs adalah 1,151% dimana kurang dari

Tabel 20

Perbandingan gaya geser statik ekuivalen struktur fixed based dan base isolation

Jenis Sistem	V _{statik} Fixed Based (kN)	V _s statik base isolation (R=2) (kN)	Perbandingan	Selisih (%)
SPRMK (R=8)	6930,25	10397,37	V _{FB} < V _{BI}	50,03
SPRMM (R=5)	11088,4		V _{FB} > V _{BI}	6,23
SPRMB (R=3)	18480,67		V _{FB} > V _{BI}	43,74
SPRMB (R=2)	27721,01		V _{FB} > V _{BI}	62,49

Tabel 21.

Rekapitulasi penulangan poer

Tipe	Dimensi (m)	Tul. Memanjang		Tul. Arah Memendek	
		Atas	Bawah	Atas	Bawah
P-1	2,7 x 4,2 x 1	D22-150	D22-150	D22-150	D22-150
P-2	4,2 x 2,7 x 1	D22-130	D22-130	D22-150	D22-150
P-3	2,4 x 2,4 x 1	D22-100	D22-100	D22-100	D22-100

5%. Sehingga permodelan sesuai dengan elemen dan beban yang direncanakan.

2) Kontrol Partisipasi Massa

Berdasarkan SNI 1726:2019 Ps. 7.9.1, perhitungan respons dinamika struktur harus memiliki massa terkombinasi minimal 90% dari massa aktual masing masing arah. Untuk rekapitulasi perhitungan dapat dilihat pada Tabel 7.

3) Kontrol Periode Getar Struktur

Berdasarkan SNI 1726:2019 Ps. 7.8.2.1, periode struktur untuk rangka pemikul momen khusus digunakan sebagai berikut:

$$T_a = C_{thnx} = 1,358 \text{ detik}$$

Dari nilai S_{d1} = 0,514, didapatkan C_t = 1,4. Sehingga C_u.T_a dapat dihitung:

$$C_u.T_a = 1,901 \text{ detik}$$

Dari program bantu ETABS 2016, didapatkan T_a maksimum sebesar 1,317 detik. Sehingga nilai periode struktur diambil sebesar nilai T=T_a = 1,358 detik.

4) Kontrol Gaya Geser Dasar

Berdasarkan SNI 1726:2019. Gaya geser dasar dinamis dalam arah yang ditinjau tidak boleh kurang dari 100% nilai akhir respons statik.

Gempa X

$$V_{dinamik} > 100\% \times V_{statik}$$

$$6932,056 \text{ kN} > 6930,254 \text{ kN} \text{ (OK!)}$$

Gempa Y

$$V_{dinamik} > 100\% \times V_{statik}$$

$$6931,215 \text{ kN} > 478261,94 \text{ kN} \text{ (OK!)}$$

Sehingga dapat disimpulkan, struktur memenuhi persyaratan.

5) Kontrol Simpangan Antar Lantai

Kontrol simpangan antar lantai mengacu pada SNI 1726:2012 Ps. 7.9.3. Rekapitulasi simpangan antar lantai dapat dilihat pada Tabel 8.

6) Kontrol Pengaruh P-Delta

Berdasarkan SNI 1726:2019 Ps. 7.8.7, pengaruh P-Delta wajib diperhitungkan apabila koefisien stabilitas (θ) bernilai 0,1 atau lebih. Untuk rekapitulasi perhitungan dapat dilihat pada Tabel 9, Dari perhitungan Tabel 9, syarat P-Delta dari struktur telah terpenuhi.

7) Kontrol Ketidakberaturan Torsi

Dalam SNI 1726:2019 Ps. 7.8.4.3, struktur yang didesain dengan kategori seismik C hingga F harus dikontrol untuk ketidakberaturan torsi. Untuk rekapitulasi perhitungan disajikan dalam Tabel 10.

D. Perencanaan Friction Pendulum System

Struktur dengan base isolation direncanakan sesuai dengan SNI 1726:2019 pasal 12 dan dari literatur lainnya prosedur desain friction pendulum melibatkan proses iterasi, secara singkat prosedur desain friction pendulum adalah (i) mengatur denah isolator dan hitung beban gravitasi pada tiap isolator, dilanjutkan dengan pengklasifikasian isolator berdasarkan beban tersebut, (ii) menentukan target properti sistem isolasi yaitu rasio redaman viscous (β_M), kekakuan efektif (K_{eff}), dan target periode efektif (T_M) saat perpindahan rencana maksimum (D_M) dari sistem isolator, (iii) menentukan jari-jari (R) FPS dan koefisien friksi (μ),(iv) lakukan iterasi untuk mendapatkan properti isolator yang sesuai dengan target sistem isolasi.

1) Denah dan Klasifikasi FPS

Pada gedung rumah susun Pasar Rebo digunakan 2 tipe FPS yaitu P1 dan P2 yang diklasifikasikan berdasarkan beban vertikal gravitasi (N_{Sd}) dan beban vertikal akibat gempa (N_{Ed}). Adapun denah dari FPS terdapat pada Gambar 5.

2) Penentuan Target Properti Sistem Isolasi

Perencanaan FPS akan diiterasi hingga properti sistem isolasi yang didapatkan mendekati nilai-nilai yang ditargetkan pada target properti sistem isolasi. Target properti sistem isolasi dapat dilihat pada Tabel 11.

3) Perencanaan Tiap FPS dan Sistem Isolasi

Setelah itu dilakukan proses perencanaan tiap isolator FPS yang melibatkan proses iterasi perpindahan FPS dengan perpindahan target sistem isolasi hingga selisih kedua nilai tersebut kecil. Setelah proses iterasi perpindahan tersebut, nilai kekakuan efektif dan redaman efektif akan digunakan untuk menghitung kekakuan dari sistem isolasi. Hasil perencanaan tiap tipe FPS dapat dilihat pada Tabel 12.

Dari hasil perencanaan tiap tipe FPS kemudian dihitung properti sistem isolasi dan nilai tersebut dibandingkan dengan nilai target properti sistem isolasi, apabila nilainya mendekati maka perhitungan dapat dilanjutkan. Perbandingan hasil perhitungan properti sistem isolasi dan target properti sistem isolasi dapat dilihat pada Tabel 13.

Setelah itu gaya geser dasar desain pada struktur terisolasi dan didapatkan gaya geser desain adalah sebagai berikut:

$$\text{Gaya geser desain struktur bawah (V}_b\text{)} = K_{Max} \cdot D_M$$

$$= 21251,339 \text{ kN}$$

$$\text{Gaya geser desain struktur atas (V}_s\text{)} = V_b \left(\frac{W_s}{W} \right)^{(1-2,5\beta_M)}$$

$$= 10397,373 \text{ kN}$$

4) Respon Spektrum Struktur Terisolasi

Pada struktur terisolasi respon spektrum pada struktur fixed based dimodifikasi dengan membagi nilai percepatan respon spektra (S_a) dengan nilai faktor redaman (B_M) sehingga didapatkan percepatan respon spektra yang lebih kecil sebagai mana Gambar 6.

5) Permodelan Struktur dengan Base Isolation

Permodelan base isolator pada ETABS dimulai dengan mengganti perletakkan jepit pada struktur *fixed based* dengan base isolator tipe FPS yang dimodelkan sebagai *link* tipe *friction isolator*. Kemudian properti FPS seperti kekakuan dan redaman efektif diinputkan pada arah U2 dan U3, sedangkan U1 dapat dijepit. Program ETABS tidak seperti SAP 2000 yang bisa menggambar base isolator menggunakan *link* secara langsung. Oleh karena itu, diperlukan pemasangan *spring* untuk mewakili property dari *link* yang telah didefinisikan yakni P1 dan P2. Permodelan struktur terisolasi dapat dilihat pada Gambar 7.

E. Analisis Struktur dan Kontrol Desain

1) Kontrol Partisipasi Massa

Berdasarkan SNI 1726:2019 Ps. 7.9.1, perhitungan respons dinamika struktur harus memiliki massa terkombinasi minimal 90% dari massa aktual masing masing arah. Untuk rekapitulasi perhitungan dapat dilihat pada Tabel 14.

2) Kontrol Gaya Geser Dasar

Berdasarkan SNI 1726:2019 Ps 12.6.2.2 untuk struktur atas gaya geser dinamik tidak boleh kurang dari 100% gaya geser dasar desain struktur atas terisolasi (V_s).

Gempa X

$$\begin{aligned} V_{dinamik} &> 100\% \times V_{statik} \\ 10399,19 \text{ kN} &> 10397,37 \text{ kN (OK!)} \end{aligned}$$

Gempa Y

$$\begin{aligned} V_{dinamik} &> 100\% \times V_{statik} \\ 10398,68 \text{ kN} &> 10397,37 \text{ kN (OK!)} \end{aligned}$$

3) Kontrol Simpangan Antar Lantai

Kontrol simpangan antar lantai struktur terisolasi mengacu pada SNI 1726:2012 Ps. 12.6.4.3. Rekapitulasi simpangan antar lantai dapat dilihat pada Tabel 15.

4) Kontrol Pengaruh P-Delta

Berdasarkan SNI 1726:2019 Ps. 7.8.7, pengaruh P-Delta wajib diperhitungkan apabila koefisien stabilitas (θ) bernilai 0,1 atau lebih. Untuk rekapitulasi perhitungan dapat dilihat pada Tabel 16.

Dari perhitungan Tabel 16 syarat P-Delta dari struktur telah terpenuhi, sehingga struktur dinyatakan stabil. Sehingga P-Delta tidak perlu diperhitungkan oleh *software*.

5) Kontrol Simpangan FPS

Simpangan pada FPS harus dikontrol dan tidak boleh melebihi perpindahan maksimum (D_M) yang telah dihitung yaitu sebesar 0,431 m. Adapun simpangan FPS pada tiap join hasil analisis ETABS dapat dilihat pada Tabel 17. Dari Tabel 17 didapatkan nilai maksimum $U_{X,max} = 315,89$ mm dan $U_{Y,max} = 403,93$ mm dimana nilai tersebut kurang dari simpangan maksimum (D_M) = 431 mm. Disimpulkan bahwa FPS mampu mengakomodasi simpangan aktual yang terjadi. Perbedaan

nilai perpindahan baik diarah X dan Y adalah akibat adanya rotasi pada struktur (Tabel 17).

6) Kontrol Cabut FPS

Dari hasil output perletakkan ETABS didapatkan terjadi cabut akibat kombinasi *envelope* minimum pada kolom-kolom eksterior. Karena FPS yang direncanakan pada tugas akhir ini tidak memiliki tahanan terhadap cabut diperlukan FPS anti uplift atau yang biasa disebut FPS X-Y sebagai mana Gambar 8.

F. Perencanaan Struktur Primer

Dimensi dan tulangan elemen struktur primer direncanakan berdasarkan gaya dalam yang diakibatkan oleh gaya geser desain struktur atas (V_s) pada struktur terisolasi.

1) Perencanaan Balok Induk

Balok induk direncanakan menjadi 5 tipe dengan mutu material beton dan baja tulangan masing-masing 30 MPa dan 400 MPa. Digunakan cover 40 mm. Rekapitulasi hasil perencanaan balok anak dapat dilihat pada Tabel 18.

2) Perencanaan Kolom

Balok induk direncanakan menjadi 9 tipe dengan mutu material beton dan baja tulangan masing-masing 35 MPa dan 400 MPa. Digunakan cover 40 mm. Rekapitulasi hasil perencanaan balok anak dapat dilihat pada Tabel 19.

3) Perencanaan Sambungan Base Isolator

Untuk menghubungkan *base isolator* dengan kolom pedestal ataupun kolom struktur atas digunakan sambungan dengan *base plate* dan baut angkur. Dari hasil perhitungan didapatkan perencanaan sambungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Ketebalan base plate} &= 2,5 \text{ cm} \\ \text{Mutu base plate} &= \text{BJ37} \\ \text{Diameter baut angkur} &= \text{Ø30 mm} \\ \text{Jumlah baut angkur} &= 8 \text{ baut} \\ \text{Panjang baut angkur} &= 450 \text{ mm} \\ \text{Mutu baut angkur} &= \text{F1554} \end{aligned}$$

G. Perbandingan Struktur Fixed Based dan Base Isolation

1) Periode Fundamental Struktur

Periode fundamental struktur dengan base isolator tipe FPS meningkat sebesar 3,172 kali dari struktur *fixed base*, karena kekakuan struktur yang berkurang akibat penggunaan *base isolation*.

2) Gaya Geser Dasar Statik Ekuivalen (V)

Dari hasil perhitungan gaya geser dasar statik ekuivalen (V) pada struktur *fixed based* dengan beberapa variasi nilai R dan perhitungan gaya dasar statik ekuivalen struktur *base isolation* (V_s), didapatkan perbedaan nilai gaya geser yang cukup signifikan yang dapat dilihat pada Tabel 20.

Lebih besarnya nilai gaya geser pada struktur base isolation dibandingkan dengan struktur SRMPK terjadi dikarenakan nilai R pada struktur *base isolation* lebih kecil yaitu R=2 dan pada struktur *fixed based* yaitu R=8. Selain itu besarnya gaya geser pada struktur base isolation juga dipengaruhi oleh kekakuan dan redaman dari isolator. Semakin kaku isolator maka gaya geser desainnya pun semakin besar, sedangkan semakin tinggi redaman gaya geser desain akan semakin kecil.

3) Perpindahan Lantai

Respon perpindahan gedung dengan menggunakan *base*

isolation relatif lebih besar dari pada *fixed based*. Hal ini akibat fleksibilitas di dasar gedung base isolation sehingga struktur akan mengalami perpindahan yang besar sebagaimana pada Gambar 9.

4) Drift Rasio

Struktur *base isolation* memiliki nilai drift rasio yang lebih kecil dari pada struktur *fixed based* sesuai Gambar 10. Didapatkan nilai reduksi *story drift* rata-rata akibat pemasangan *base isolation* adalah 68,2% diarah X dan 47,35% diarah Y (Gambar 10).

H. Perencanaan Struktur Bawah

1) Perencanaan Sloof

Sloof digunakan untuk menghubungkan poer dengan pilecap lainnya. Beban yang bekerja pada sloof yaitu berat sendiri sloof, berat dinding basement, dan 10% beban aksial yang diambil dari kolom. Dari hasil perhitungan didapatkan sebagai berikut:

Dimensi	= 400 x 600 mm
Tul. Utama	= 10D25 ($f_y = 400$ MPa)
Tul. Geser	= 2D10 – 250 mm ($f_y = 400$ MPa)
Cover	= 75 mm

2) Perencanaan Pondasi

Pondasi direncanakan menggunakan tiang pancang produk PT. Wijaya Karya dengan beberapa tipe dan ukuran. Untuk pondasi tipe 1 dan 2 menggunakan tipe pancang *spun pile* dengan diameter 60 cm dengan kedalaman 11 m. Sedangkan pondasi tipe 3 menggunakan tiang pancang *spun square pile* ukuran 40x40 cm dengan kedalaman 12 m. Pondasi dikontrol sebagai berikut: Kontrol P_{group} 1 tiang maksimum, kontrol P_{ijin} bahan, kontrol defleksi, dan kontrol momen maksimum.

3) Perencanaan Poer/Pilecap

Poer berfungsi untuk menyalurkan beban dari kolom menuju ke pondasi, sehingga dibutuhkan penulangan. Penulangan poer dimodelkan sebagai perletakan jepit di kolom. Dan pondasi tiang pancang dimodelkan sebagai beban terpusat. Rekapitulasi perhitungan poer disajikan dalam Tabel 21.

4) Perencanaan Tusuk Konde

Sambungan pilecap dan tiang pancang digunakan tulangan tusuk konde. Dengan menggunakan program SPColumn didapatkan hasil perencanaan tusuk konde untuk 2 tipe tiang pancang adalah sebagai berikut:

Tiang spun square pile ukuran 40x40 cm = 12D20

Tiang spun pile diameter diameter 60 cm = 10D32

V. KESIMPULAN

Hasil perhitungan perencanaan struktur sekunder pada rumah susun Pasar lantai (Tebal pelat tipe S1 = 13 cm, tebal pelat tipe S2 = 10 cm, tebal pelat tipe S3 = 12 cm, tebal pelat tipe S4 = 10 cm). Perencanaan tangga (Tebal pelat tangga tipe 1 = 20 cm, tebal pelat tangga tipe 2 = 20 cm). Balok anak (Dimensi balok anak BA1 = 250x400 mm, dimensi balok anak BA2 = 250 x 400 mm). Balok lift (Dimensi balok gantung = 250 x 400 mm, dimensi balok

tumpu= 250 x 400 mm). (2) *Base isolator* yang digunakan pada gedung ini ada dua tipe yaitu SIP-D-HF-325 (5000) dan SIP-D-HF-326 (5000) yang merupakan produk dari Maurer. (3) Perbandingan perilaku struktur *base isolation* dengan struktur *fixed based* berdasarkan periode struktur, gaya geser dasar, perpindahan lantai atap, dan *drift rasio* adalah sebagai berikut: (a) Struktur dengan base isolation memiliki periode 3,17 kali lebih besar dari periode struktur fixed based. (b) Struktur *base isolation* memiliki gaya geser dasar yang lebih kecil dari struktur *fixed based* yang menggunakan sistem SRPMM (R=5), SRPMB (R=3), SRPMB (R=2) dengan selisih masing-masing sebesar 6,23% , 43,4%, dan 62,49%. Akan tetapi struktur base isolation memiliki gaya geser yang lebih besar dari struktur SRPMB dengan selisih sebesar 50,03%. (c) Struktur dengan *base isolation* memiliki perpindahan atap yang lebih besar dari struktur *fixed based*. Selain itu periode untuk satu siklus perpindahan pada struktur terisolasi lebih besar dari struktur terjepit. (d) Penggunaan *base isolation* pada struktur mereduksi drift rasio dengan selisih rata-rata 68,2% diarah X dan 47,35% diarah Y. (4) Hasil perencanaan struktur bawah pada gedung rumah susun Pasar Rebo yang meliputi balok sloof dan pondasi adalah sebagai berikut: (a) Perencanaan balok sloof, dimensi balok sloof = 400 x 600 mm. (b) Perencanaan pondasi, pada gedung rumah susun Pasar Rebo digunakan 2 tipe pondasi berbeda sebagai berikut: Tipe 1, digunakan tiang pancang berukuran 60 cm dengan jumlah 6 dan dipasang hingga kedalaman 11 m. Pile cap yang direncanakan berdimensi 2,7 x 4,2 x 1 m dengan tulangan D22-140 mm dan D22 140 mm. Tipe 2, digunakan tiang pancang berukuran 60 cm dengan jumlah 4 dan dipasang hingga kedalaman 11 m. Pile cap yang direncanakan berdimensi 4,2 x 2,7 x 1 m dengan tulangan D22-130 mm dan D22-130 mm. Tipe 3, digunakan tiang pancang spun square pile ukuran 40 cm x 40 cm dengan jumlah 8 dan dipasang hingga kedalaman 14 m. Pile cap yang direncanakan berdimensi 3,8 x 1,8 x 1 m dengan tulangan D22-100 mm dan D22-100 mm. Rebo adalah sebagai berikut: (1) Perencanaan pelat

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. A. Somwanshi and R. N. Pantawane, "Seismic analysis of fixed based and base isolated building structures," *Int. J. Multidiscip. Curr. Res.*, vol. 3, pp. 2321–3124, 2015.
- [2] S. Tolani and A. Sharma, "Effectiveness of base isolation technique and influence of isolator characteristics on response of a base isolated building," *Am. J. Eng. Res.*, no. 55, pp. 2320–847, 2016.
- [3] N. Makris, "Seismic isolation: Early history," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 48, no. 2, pp. 269–283, 2019, doi: 10.1002/eqe.3124.
- [4] I. E. Kavvadias, H. F. Bibo, and L. K. Vasiliadis, "Finite element modeling of single and multi-spherical friction pendulum bearings," *COMPADYN 2017 - Proc. 6th Int. Conf. Comput. Methods Struct. Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 2, no. June, pp. 4408–4416, 2017, doi: 10.7712/120117.5733.18107.
- [5] M. Ismail, "Seismic isolation of structures. Part I: Concept, review and a recent development," *Hormigón y Acero*, vol. 69, no. 285, pp. 147–161, 2018, doi: 10.1016/j.hya.2017.10.002.
- [6] F. Scheaua, "Friction pendulum dampers for earthquake isolated structural systems," *Rom. J. Acoust. Vib.*, vol. 9, no. 1, pp. 29–32, 2012.
- [7] A. Hacheem and I. K. Al-Shimmari, "Finite element analysis of a friction pendulum bearing base isolation system for earthquake loads," *J. Eng.*, vol. 16, no. 3, pp. 5315–5336, 2010.