

ANALISIS PERBANDINGAN KINERJA STRUKTUR BANGUNAN FIXED-BASE DAN BASE-ISOLATION DENGAN VARIASI REDAMAN EFEKTIF ISOLATOR

Cristo M. L. Ngasi Raja¹ (elsongasiraja@gmail.com)

Partogi H. Simatupang² (partogihsimatupang@gmail.com)

Dantje A. T. Sina³ (dantjesina@staf.undana.ac.id)

ABSTRAK

Indonesia merupakan negara yang rawan terhadap bencana kegempaan. Indonesia terletak pada cincin api Pasifik dan di atas lempeng tektonik sehingga berpotensi terjadi gempa bumi yang menyebabkan kerusakan pada bangunan dan infrastruktur. Seiring perkembangan dunia konstruksi, telah dikembangkan berbagai teknologi peredam gempa, salah satunya sistem isolasi dasar (*base isolation*). Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja struktur dari bangunan konvensional (*fixed base*) terhadap bangunan *base isolation* yang divariasikan redaman efektif isolator sebesar 2%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, dan 30%. Prosedur analisis seismik mengacu pada SNI 1726:2019 menggunakan metode statik ekuivalen dan dinamik respons spektrum. Evaluasi tingkat kinerja struktur mengacu pada ATC-40 menggunakan metode statik non-linear *pushover*. Hasil penelitian ini menunjukkan respon seismik struktur berupa gaya geser dasar, perpindahan dan simpangan antar lantai, serta gaya dalam pada elemen struktural mengalami tren negatif (penurunan) yang terjadi secara non-linear seiring dengan peningkatan nilai redaman efektif isolator. Hasil evaluasi tingkat kinerja struktur menunjukkan bahwa penggunaan *base isolator* mampu meningkatkan level kinerja struktur dimana pada struktur *fixed base* memiliki level *Damage Control* (DC), meningkat menjadi level *Immediate Occupancy* (IO) pada struktur *base isolation*.

Kata Kunci: Kinerja Struktur, *Fixed Base*, *Base Isolation*, Redaman Efektif Isolator

ABSTRACT

Indonesia is prone to seismic disasters due to its location on the Pacific Ring of Fire and top of tectonic plates, making it susceptible to earthquakes that can cause damage to buildings and infrastructures. Along with advancements in construction technology, various technologies have been developed to reduce the influence of earthquake loads on buildings, one of them is the base isolation system. This research aims to compare the performance of structures between conventional (*fixed base*) buildings and buildings with base isolation, varying the effective damping of isolators at 2%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, and 30%. Seismic analysis procedures adhere to SNI 1726:2019 using static equivalent and dynamic response spectrum methods. Structural performance evaluation follows ATC-40 guidelines utilizing static non-linear *pushover* analysis. The research results indicate seismic responses such as base shear forces, floor displacements, inter-story drifts, and internal forces in structural elements showing a negative trend (decrease) occurring non-linearly with increasing values of isolator's effective damping. The structural performance evaluation reveals that the use of base isolators can enhance the structural performance level. structures with *Damage Control* (DC) level, the performance improves to *Immediate Occupancy* (IO) on base isolation structure.

Keywords: Structure Performance, *Fixed Base*, *Base Isolation*, Effective Damping of Isolator

¹ Prodi Teknik Sipil, FST Undana (penulis korespondensi);

² Prodi Teknik Sipil, FST Undana;

³ Prodi Teknik Sipil, FST Undana.

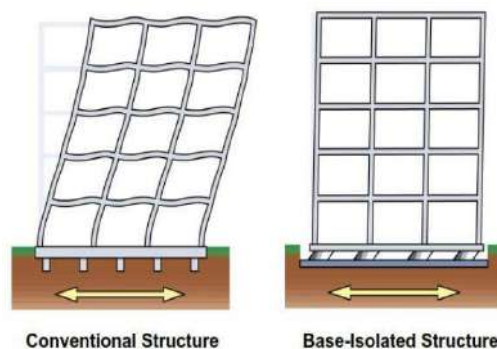
PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang rawan terhadap bencana kegempaan. Negara ini terletak pada cincin api Pasifik, sebuah zona geologi di mana aktivitas vulkanik dan gempa bumi sering terjadi. Wilayah Indonesia terletak di atas lempeng tektonik aktif yang saling bertabrakan, sehingga sering terjadi gempa bumi yang cukup besar dan berpotensi menyebabkan kerusakan yang serius pada bangunan dan infrastruktur. Seiring dengan perkembangan dunia konstruksi, telah dikembangkan berbagai teknologi dan perangkat untuk mereduksi beban gempa pada bangunan, salah satunya sistem isolasi dasar (*base isolation*). Sistem ini memisahkan struktur bawah dan struktur atas yang merupakan kesatuan sistem struktur yang utuh dan kaku. Penggunaan *base isolator* mampu meningkatkan perpindahan pada lantai dasar namun mereduksi simpangan antar lantai karena bangunan bergerak sebagai satu kesatuan struktur yang kaku (Hasdanita et al., 2018), serta mampu mereduksi gaya geser dasar seismik akibat beban gempa (Nggaba et al., 2021). Ditinjau dari aspek kinerja struktur, *base isolator* mampu meningkatkan kinerja struktur bangunan dari level *Collapse Prevention* menjadi *Immediate Occupancy* berdasarkan ketentuan FEMA 440 (Gabriel, 2022). Salah satu faktor yang mempengaruhi perubahan tersebut adalah kemampuan perangkat *base isolator* dalam mendisipasi/mereduksi energi gempa, disebut juga redaman efektif (*effective damping*). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan kinerja struktur pada bangunan *fixed base* dengan bangunan *base isolation* yang divariasikan nilai redaman efektif isolator sebesar 2%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, dan 30%.

TINJAUAN PUSTAKA

Sistem Isolasi Dasar

Konsep sistem isolasi dasar (*base isolation*) adalah memisahkan struktur atas bangunan dengan struktur dasar bangunan yang berhubungan dengan tanah sehingga efek gerakan tanah akibat gempa pada struktur atas bangunan dapat diredam dan mencegah kerusakan pada struktur. Sistem ini akan memisahkan bangunan atau struktur dari komponen horizontal pergerakan tanah dengan menyisipkan bahan isolator, disebut juga *base isolator*, dengan kekakuan horizontal yang relatif kecil antara bangunan atas dengan pondasinya (Naeim & Kelly, 1999). Perbandingan model struktur konvensional tanpa isolasi dasar (*fixed base*) dengan struktur yang menggunakan sistem isolasi dasar (*base isolation*) ditampilkan pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Perbandingan Struktur Konvensional (*Fixed Base*) dengan Struktur Berisolasi Dasar (*Base Isolation*) (Andrian et al., 2017)

Analisis Seismik Struktur Tahan Gempa Menurut SNI 1726:2019

Perencanaan struktur bangunan tahan gempa mengacu pada regulasi SNI 1726:2019 (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Adapun metode analisis seismik yang digunakan dalam penelitian ini yakni metode statik ekuivalen dan metode dinamik respons spektrum. Parameter hasil analisis seismik berupa gaya geser dasar seismik struktur, perpindahan lantai, dan simpangan antar lantai.

1. Gaya Geser Dasar Seismik

Gaya geser dasar seismik (V) dalam arah yang ditetapkan harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut.

$$V = C_s W \quad (1)$$

Sedangkan pada sistem *base isolation*, untuk elemen struktural dibawah tingkat dasar harus direncanakan mampu menahan gaya seismik lateral minimum (V_b) dengan persamaan berikut.

$$V_b = k_M D_M \quad (2)$$

Untuk elemen struktural diatas tingkat dasar, harus direncanakan mampu menahan gaya geser minimum (V_s) dengan persamaan berikut.

$$V_s = \frac{V_b}{R_I} \quad (3)$$

dengan

V adalah gaya geser dasar seismik (kN)

C_s adalah koefisien respons seismik

W adalah berat seismik efektif (kN)

k_M adalah kekakuan efektif minimum sistem isolasi (kN/m)

D_M adalah perpindahan maksimum sistem isolasi (m)

R_I adalah koefisien numerik yang berhubungan dengan tipe sistem pemikul gaya seismik di atas sistem isolasi

2. Perpindahan dan Simpangan Antar Lantai

Simpangan antar lantai (Δ) merupakan selisih perpindahan pada pusat massa lantai atas dan lantai dibawahnya pada lantai yang ditinjau. Simpangan antar tingkat tidak boleh melebihi simpangan antar tingkat izin (Δ_a), dimana untuk struktur SRPMK *fixed base* dengan kategori resiko I memiliki nilai Δ_a sebesar $0,020h_{sx}$ dan pada struktur *base isolation* memiliki nilai Δ_a sebesar $0,015h_{sx}$, dengan h_{sx} merupakan tinggi lantai dibawah lantai yang ditinjau.

Evaluasi Kinerja Struktur Menurut ATC-40

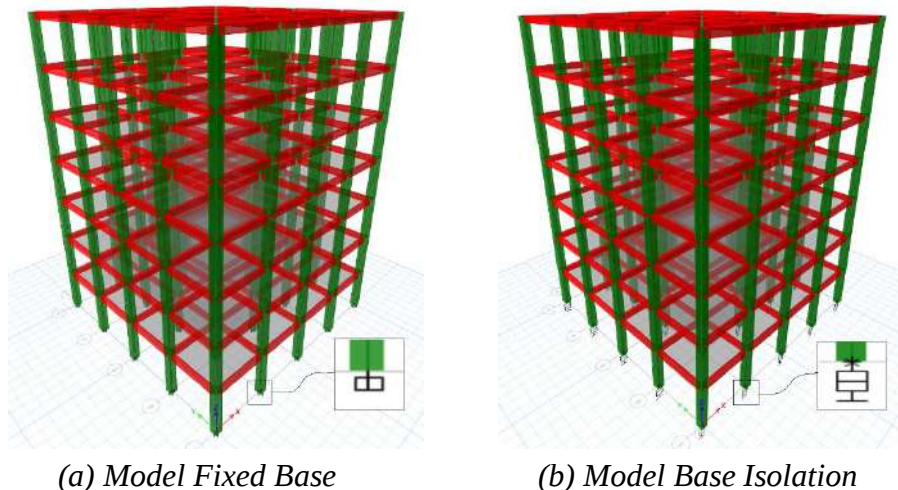
Kinerja struktur adalah tingkatan performa suatu struktur terhadap gempa rencana. Tingkatan performa struktur dapat diketahui dengan melihat tingkat kerusakan pada struktur ketika terkena gempa rencana dengan periode ulang tertentu. Metode yang digunakan dalam ATC-40 untuk menentukan tingkat kinerja struktur adalah metode spektrum kapasitas (*capacity-spectrum*). Metode ini menggunakan prosedur analisis *pushover*, yaitu dengan memberikan beban lateral statik tertentu sebagai idealisasi pengaruh beban gempa pada struktur hingga struktur mencapai suatu batas tertentu atau mengalami kegagalan struktur yang ditandai dengan terjadinya pelepasan (sendi plastis) pertama pada struktur (Tavio & Wijaya, 2018). Level kinerja struktur (*performance level*) terbagi atas *Immediate Occupancy (IO)*, *Damage Control (DC)*, *Life Safety (LS)*, dan *Structural Stability (SS)* (ATC-40, 1996). Tingkat kinerja struktur dapat ditentukan menurut batasan deformasi seperti yang disajikan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Batasan Simpangan pada Tingkat Kinerja Struktur (ATC-40, 1996)

Interstory Drift Limit	Performance Level			
	Immediate Occupancy	Damage Control	Life Safety	Structural Stability
Maximum total drift	0.01	0.01-0.02	0.02	0.33 V_i/P_i
Maximum inelastic drift	0.005	0.005-0.015	No limit	No limit

METODE PENELITIAN

Struktur bangunan yang diteliti dalam penelitian ini merupakan model bangunan beton bertulang beraturan yang diasumsikan berlokasi di Kota Kupang, dengan fungsional sebagai perkantoran setinggi 7 lantai dengan tinggi tiap lantai sebesar 4 meter sehingga tinggi total bangunan adalah 28 meter. Bangunan ini berdimensi 20 m x 20 m dengan panjang tiap bentang adalah 5 meter. Sistem pemikul gaya seismik yang digunakan adalah SRPMK. Metode analisis seismik yang digunakan mengacu pada SNI 1726:2019 dengan metode analisis statik ekuivalen dan analisis dinamik respons spektrum. Sedangkan evaluasi tingkat kinerja struktur mengacu pada ATC-40 dengan metode analisis statik non-linear *pushover*. Proses analisis menggunakan program bantu ETABS v.20 dengan membuat model untuk kedua jenis bangunan (*fixed base* dan *base isolation*) seperti yang ditampilkan pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Model 3 Dimensi Model Fixed Base dan Base Isolation

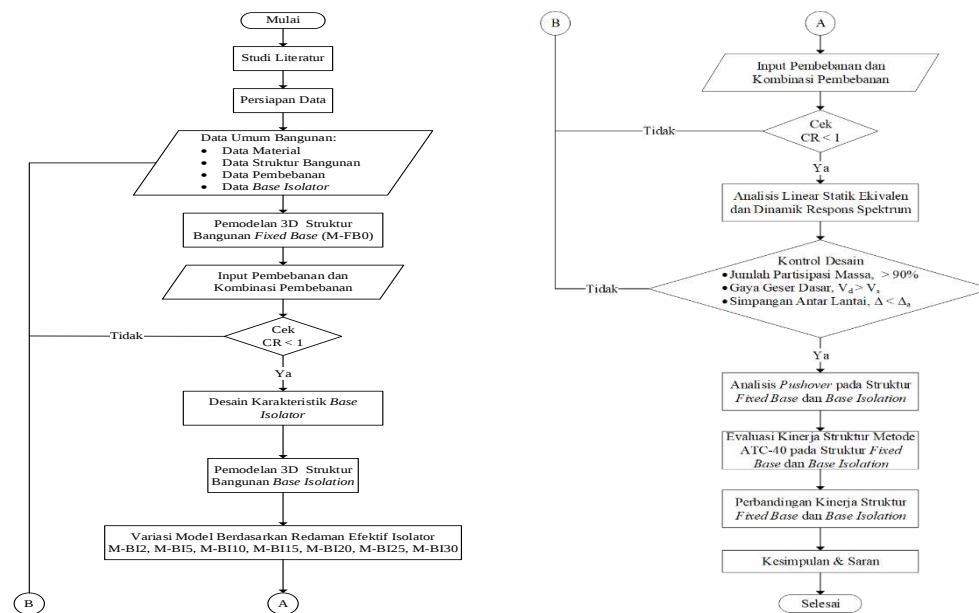
Dalam penelitian ini, akan dikaji 8 model struktur yang dibedakan oleh variasi redaman efektif *base isolator* seperti yang diuraikan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Daftar Model Bangunan

No.	Model	Keterangan
1	M-FB0	Model bangunan tanpa isolasi dasar (<i>fixed base</i>), sehingga tidak ada pengaruh redaman tambahan dari isolator (0%)
2	M-BI2	Model bangunan <i>base isolation</i> dengan nilai redaman efektif isolator sebesar 2%
3	M-BI5	Model bangunan <i>base isolation</i> dengan nilai redaman efektif isolator sebesar 5%
4	M-BI10	Model bangunan <i>base isolation</i> dengan nilai redaman efektif isolator sebesar 10%
5	M-BI15	Model bangunan <i>base isolation</i> dengan nilai redaman efektif isolator sebesar 15%
6	M-BI20	Model bangunan <i>base isolation</i> dengan nilai redaman efektif isolator sebesar 20%
7	M-BI25	Model bangunan <i>base isolation</i> dengan nilai redaman efektif isolator sebesar 25%
8	M-BI30	Model bangunan <i>base isolation</i> dengan nilai redaman efektif isolator sebesar 30%

Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian memuat tahapan pelaksanaan penelitian ini. Diagram alir penelitian ditampilkan pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Periode Fundamental Struktur

Pada model bangunan *fixed base* (M-FB0), perlu ditentukan nilai periode fundamental pendekatan (T_a) yang dapat dihitung sebagai berikut.

$$T_a = C_i h_n^x = 0,0466 \times 28^{0,90} = 0,935 \text{ detik}$$

Nilai periode fundamental struktur (T) tidak boleh melebihi batasan atas periode (T_{max}) yang dihitung sebagai berikut.

$$T_{max} = T_a C_u = 0,935 \times 1,4 = 1,309 \text{ detik}$$

Dan periode fundamental struktur dari hasil analisis program ETABS v.20 ($T_{program}$) sebesar 1,477 detik. Maka, nilai periode fundamental struktur (T) untuk model bangunan *fixed base* (M-FB0) dapat diambil sebesar 1,309 detik. Sedangkan pada model bangunan *base isolation* (M-BI2 s/d M-BI30), dengan mengacu pada SNI 1726:2019 Pasal 12.4.1 dimana periode efektif struktur dengan sistem isolasi, T_M , lebih besar 3 kali dari periode efektif struktur terjepit sehingga dapat dihitung secara matematis sebagai berikut.

$$T_M \geq 3 \times T = 3 \times 1,309 \text{ detik} = 3,927 \text{ detik}$$

Desain Karakteristik Base Isolator

Desain karakteristik pada perangkat isolator tipe *rubber bearing* mencakup dimensi perangkat isolator (diameter dan luasan), kekakuan horizontal dan kekakuan vertikal isolator yang sama untuk tiap model *base isolation* sebagai berikut.

Diameter isolator : 0,800 meter

Kekakuan horizontal isolator : 1246,584 kN/m

Shape factor : 20

Kekakuan vertikal isolator : 2991801,516 kN/m

Sedangkan nilai perpindahan maksimum sistem isolasi (D_M) pada tiap model *base isolation* berbeda satu sama lain diakibatkan oleh faktor redaman efektif isolator. Nilai perpindahan maksimum untuk tiap model bangunan *base isolation* disajikan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Nilai Perpindahan Maksimum Base Isolator

Model	M-BI2	M-BI5	M-BI10	M-BI15	M-BI20	M-BI25	M-BI30
Nilai D_M (m)	0,689	0,552	0,460	0,409	0,368	0,345	0,324

Gaya Geser Dasar Seismik

Gaya geser dasar seismik total dari seluruh gaya lateral akibat gempa yang diterima oleh bangunan dan merupakan total dari gaya lateral gempa yang diterima setiap lantainya. Karena merupakan bangunan simetris, maka nilai gaya geser seismik untuk kedua arah (X dan Y) adalah sama. Hasil perhitungan gaya geser dasar statik dan dinamik untuk semua model bangunan disajikan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Gaya Geser Dasar Seismik Semua Model Bangunan (Arah X=Y)

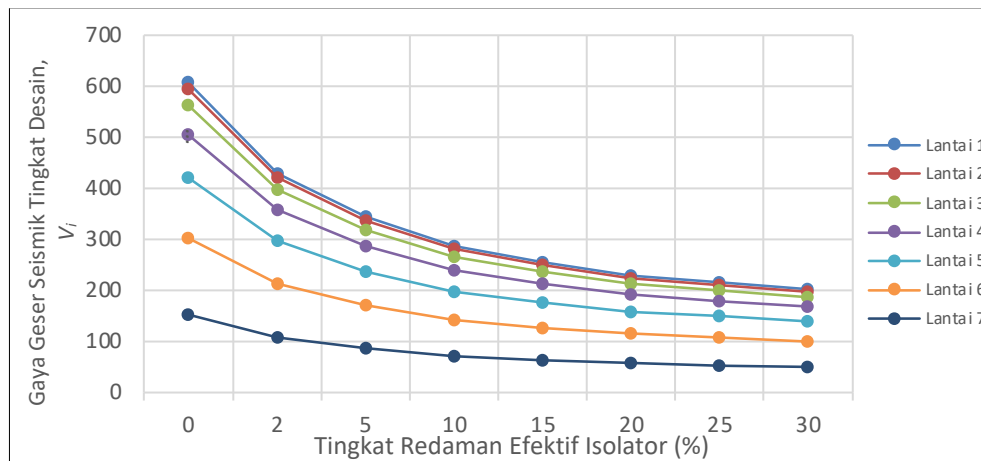
Model	M-FB0	M-BI2	M-BI5	M-BI10	M-BI15	M-BI20	M-BI25	M-BI30
Gaya Geser Statik, V (kN)	607,326	429,708	343,767	286,472	254,642	229,178	214,854	202,216
Gaya Geser Dinamik, V_t (kN)	448,586	252,876	220,675	183,316	157,092	136,750	120,255	106,010

Gaya geser dasar hasil analisis dinamik respons spektrum (V_t) kurang dari gaya geser dasar hasil analisis statik ekuivalen (V), maka gaya tersebut harus dikalikan dengan V/V_t . Hasil penskalaan gaya geser dasar dengan faktor skala koreksi disajikan pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Hasil Penskalaan Gaya Geser Dasar pada Semua Model (Arah X=Y)

Model	Gaya Geser Statik, V (kN)	Skala Desain, V/V_t	Faktor Skala Koreksi	Gaya Geser Dinamik, V_t (kN)	Kontrol $V_t \geq V$
M-FB0	607,326	1,354	1660,179	607,326	OK
M-BI2	429,708	1,699	2083,753	429,708	OK
M-BI5	343,767	1,558	1910,248	343,767	OK
M-BI10	286,472	1,563	1916,290	286,472	OK
M-BI15	254,642	1,621	1987,717	254,642	OK
M-BI20	229,178	1,676	2055,063	229,178	OK
M-BI25	214,854	1,787	2190,880	214,854	OK
M-BI30	202,216	1,908	2339,087	202,216	OK

Nilai gaya geser dasar tersebut kemudian dapat didistribusikan secara lateral pada tiap lantainya yang disajikan pada Gambar 4 berikut, dimana model *fixed base* M-FB0 direpresentasikan dengan tingkat redaman efektif isolator 0% dan model *base isolation* M-BI2 s/d M-BI30 direpresentasikan dengan tingkat redaman efektif isolator 2% hingga 30%.



Gambar 4. Grafik Distribusi Gaya Seismik Lateral Tingkat Desain Berdasarkan Tingkat Redaman Efektif Isolator (Arah X=Y)

Dari hasil analisis gaya geser seismik, dapat disimpulkan bahwa nilai gaya geser dasar pada semua model bangunan *base isolation* lebih kecil dibanding gaya geser dasar pada model bangunan *fixed base*. Hal ini disebabkan oleh kemampuan perangkat *base isolator* dalam meredam energi gempa yang terjadi pada dasar bangunan sehingga intensitas gaya gempa yang bekerja pun mengalami reduksi. Seiring dengan semakin besarnya pengaruh nilai redaman efektif pada isolator maka reduksi gaya geser dasar pun juga semakin besar dan pola penurunan terjadi secara non-linear. Adapun persentase perbandingan gaya geser dasar model bangunan *base isolation* terhadap model bangunan *fixed base* berdasarkan tingkat redaman efektif isolator berdasarkan Tabel 5 diatas disajikan pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Perbandingan Gaya Geser Dasar Model Base Isolation Terhadap Model Fixed Base

Tingkat Redaman Efektif Isolator	2%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Perbandingan Terhadap Fixed Base	-29,25%	-43,40%	-52,83%	-58,07%	-62,26%	-64,62%	-66,70%

Perpindahan dan Simpangan Antar Lantai

Nilai perpindahan pusat massa hasil analisis elastik (δ_{xe}) diperoleh dari *output* nilai *story displacement* hasil analisis menggunakan program ETABS v.20. Hasil perhitungan perpindahan pada arah X=Y untuk semua model bangunan disajikan pada Tabel 7 berikut.

Tabel 7. Perpindahan Lantai pada Semua Model (Arah X=Y)

Lantai	M-FB0 (mm)	M-BI2 (mm)	M-BI5 (mm)	M-BI10 (mm)	M-BI15 (mm)	M-BI20 (mm)	M-BI25 (mm)	M-BI30 (mm)
7	206,2885	121,302	97,028	80,844	71,854	64,662	60,616	57,046
6	190,8225	117,326	93,848	78,198	69,502	62,546	58,634	55,18
5	167,002	111,2	88,95	74,118	65,876	59,284	55,576	52,304
4	135,135	103,004	82,396	68,658	61,026	54,920	51,484	48,454
3	97,3335	93,286	74,624	62,182	55,270	49,742	46,632	43,886
2	56,8975	82,906	66,322	55,266	49,124	44,210	41,446	39,008
1	19,767	73,416	58,732	48,942	43,504	39,154	36,706	34,546
0	0	68,862	55,236	46,152	41,106	37,068	34,798	32,794

Hasil perhitungan simpangan antar lantai pada arah X=Y untuk semua model bangunan disajikan pada Tabel 8 berikut.

Tabel 8. Simpangan Antar Lantai pada Semua Model (Arah X=Y)

Lantai	M-FB0 (mm)	M-BI2 (mm)	M-BI5 (mm)	M-BI10 (mm)	M-BI15 (mm)	M-BI20 (mm)	M-BI25 (mm)	M-BI30 (mm)
7	15,466	3,976	3,18	2,646	2,352	2,116	1,982	1,866
6	23,8205	6,126	4,898	4,08	3,626	3,262	3,058	2,876
5	31,867	8,196	6,554	5,46	4,850	4,364	4,092	3,85
4	37,8015	9,718	7,772	6,476	5,756	5,178	4,852	4,568
3	40,436	10,38	8,302	6,916	6,146	5,532	5,186	4,878
2	37,1305	9,49	7,59	6,324	5,620	5,056	4,74	4,462
1	19,767	4,554	3,496	2,79	2,398	2,086	1,908	1,752
0	0	0	0	0	0	0	0	0

Simpangan antar lantai desain disyaratkan untuk tidak melebihi simpangan antar lantai izin (Δ_a). Simpangan antar lantai izin untuk model *fixed base*:

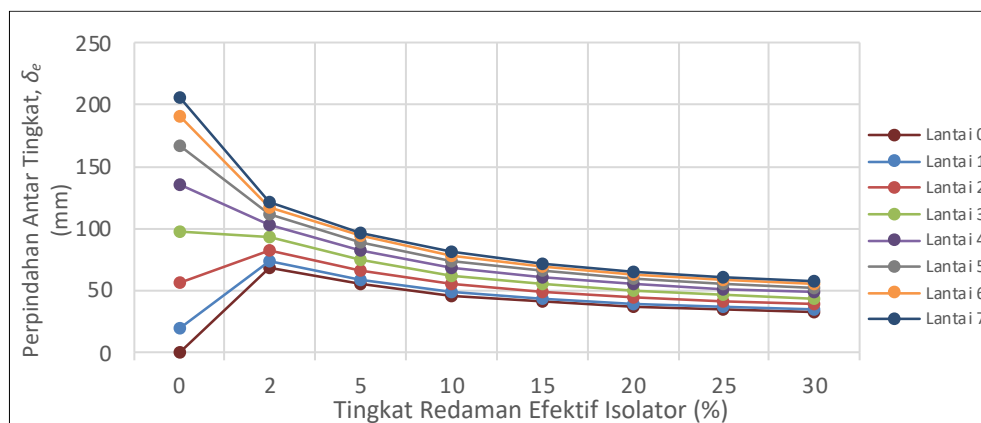
$$\Delta_a = 0,020h_{sx}/\rho = 0,020(4000 \text{ mm})/1,3 = 61,538 \text{ mm}$$

Simpangan antar lantai izin untuk model *base isolation*:

$$\Delta_a = 0,015h_{sx}/\rho = 0,015(4000 \text{ mm})/1,3 = 46,154 \text{ mm}$$

Berdasarkan nilai simpangan antar lantai yang terjadi pada tiap model struktur, dapat disimpulkan bahwa tiap model telah memenuhi kontrol simpangan antar lantai izin dimana simpangan antar lantai desain lebih kecil dari simpangan antar lantai izin.

Nilai perpindahan lantai yang terjadi dapat disajikan dalam grafik berdasarkan kenaikan tingkat redaman pada struktur akibat pengaruh redaman efektif isolator terhadap perubahan yang terjadi pada tiap lantai. Grafik perpindahan lantai ditampilkan pada Gambar 6 berikut.



Gambar 5. Grafik Perpindahan Lantai Berdasarkan Tingkat Redaman Efektif Isolator

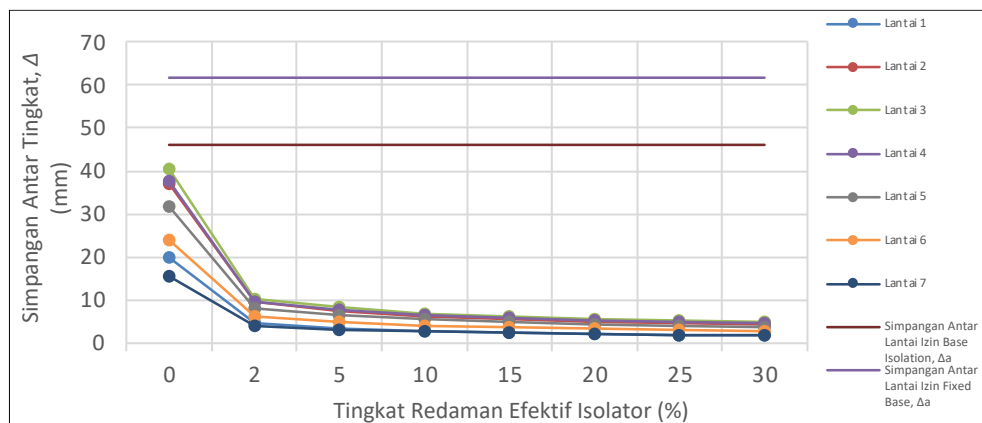
Dari Gambar diatas, terlihat bahwa pada model bangunan *base isolation* terjadi perpindahan pada dasar bangunan (grafik Lantai 0) akibat adanya perangkat *base isolator* pada dasar bangunan. Karakteristik dari perangkat *rubber base isolator* yaitu memiliki fleksibilitas pada arah horizontal sehingga ketika dibebankan secara horizontal (akibat beban seismik) akan mengalami perpindahan, berbeda dengan model bangunan *fixed base* yang terjepit pada dasar sehingga tidak mengalami perpindahan. Namun jika ditinjau terhadap perpindahan lantai maksimum yang terjadi pada lantai atap (grafik Lantai 7), perpindahan pada semua model

bangunan *base isolation* mengalami reduksi secara non-linear terhadap model bangunan *fixed base* seiring dengan kenaikan tingkat redaman efektif isolator. Adapun persentase perbandingan perpindahan dan simpangan antar lantai maksimum untuk model bangunan *base isolation* terhadap model bangunan *fixed base* berdasarkan tingkat redaman efektif isolator disajikan pada Tabel 9 berikut.

Tabel 9. Perbandingan Perpindahan Lantai Maksimum Model Base Isolation Terhadap Model Fixed Base

Tingkat Redaman Efektif Isolator	2%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Perbandingan Terhadap Fixed Base	-41,20%	-52,96%	-60,81%	-65,17%	-68,65%	-70,62%	-72,35%

Sedangkan nilai simpangan antar lantai juga dapat disajikan dalam grafik yang ditampilkan pada Gambar 6 berikut.



Gambar 6. Grafik Simpanan Antar Lantai Berdasarkan Tingkat Redaman Efektif Isolator

Dari Gambar diatas, terlihat bahwa simpangan antar lantai pada tiap lantainya untuk model *base isolation* mengalami reduksi yang sangat signifikan dibanding model *fixed base*. Hal ini dikarenakan struktur bangunan diatas sistem isolasi berperilaku sebagai satu kesatuan struktur rigid yang kaku. Ketika mengalami getaran horizontal akibat beban seismik, struktur dibawah sistem isolasi, dalam hal ini fondasi, akan bergerak mengikuti pergerakan tanah sedangkan struktur diatas sistem isolasi sebagai satu kesatuan struktur terpisah akan mempertahankan posisinya agar tidak terjadi simpangan yang berlebihan pada struktur. Jika dibandingkan terhadap sesama model bangunan *base isolation*, simpangan antar lantai akan semakin menurun seiring dengan semakin besarnya nilai redaman efektif isolator yang terjadi secara non-linear. Adapun persentase perbandingan perpindahan dan simpangan antar lantai maksimum untuk model bangunan *base isolation* terhadap model bangunan *fixed base* berdasarkan tingkat redaman efektif isolator disajikan pada Tabel 10 berikut.

Tabel 10. Perbandingan Simpangan Antar Lantai Maksimum Model Base Isolation Terhadap Model Fixed Base

Tingkat Redaman Efektif Isolator	2%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Perbandingan Terhadap Fixed Base	-74,33%	-79,47%	-82,90%	-84,80%	-86,32%	-87,17%	-87,94%

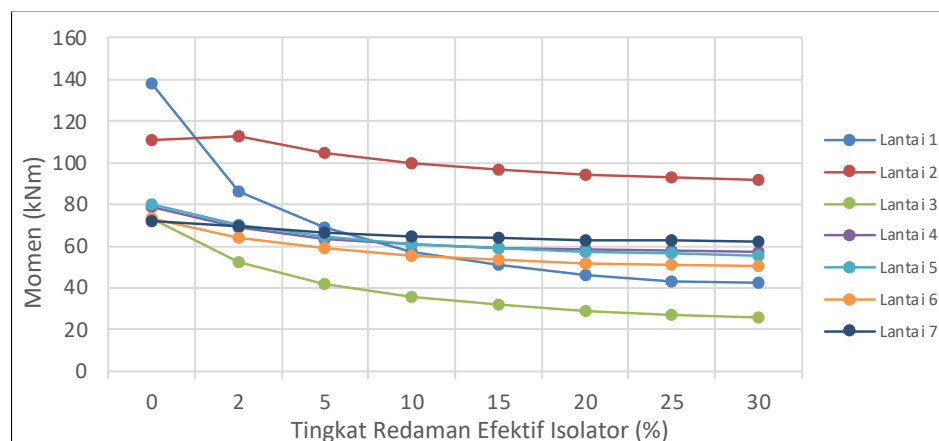
Momen dan Gaya Geser Kolom Antar Lantai

Nilai momen kolom antar lantai untuk tiap lantai pada kondisi pembebanan ultimit untuk tiap model bangunan disajikan pada Tabel 11 berikut.

Tabel 11. Momen Kolom Antar Lantai pada Semua Model Bangunan

Model	Momen (kNm)						
	Lantai 7	Lantai 6	Lantai 5	Lantai 4	Lantai 3	Lantai 2	Lantai 1
M-FB0	72,018	73,345	80,167	78,749	73,400	110,692	137,906
M-BI2	69,501	64,061	70,384	69,040	52,134	112,685	86,131
M-BI5	66,756	58,869	64,769	63,431	42,142	104,807	68,973
M-BI10	64,925	55,408	61,026	60,700	35,480	99,555	57,534
M-BI15	63,909	53,485	58,947	59,373	31,780	96,637	51,179
M-BI20	63,095	51,947	57,283	58,311	28,819	94,302	46,095
M-BI25	62,638	51,081	56,347	57,714	27,154	92,989	43,236
M-BI30	62,234	50,318	55,521	57,186	25,684	91,831	42,487

Momen kolom yang terjadi di tiap lantai berdasarkan tingkat redaman efektif isolator dapat disajikan dalam format grafik yang ditampilkan pada Gambar 7 berikut.



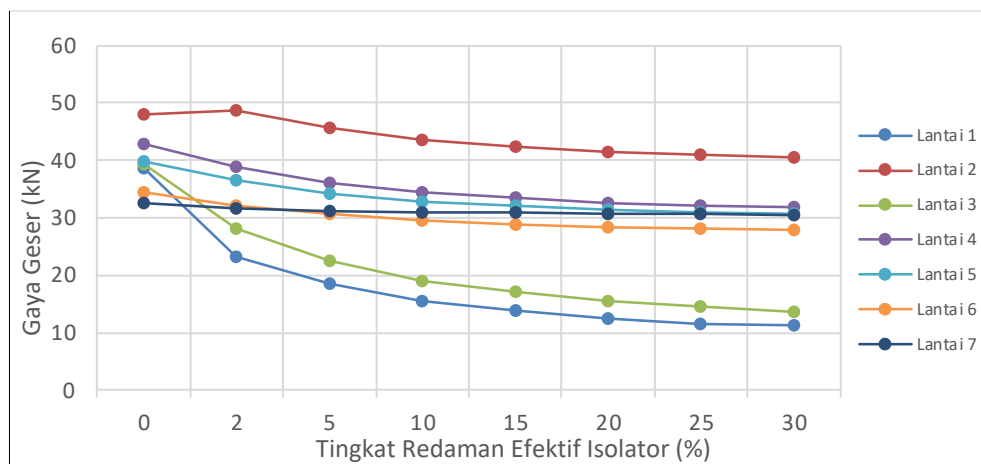
Gambar 7. Grafik Momen Kolom Antar Lantai Berdasarkan Tingkat Redaman Efektif Isolator

Sedangkan nilai gaya geser kolom antar lantai untuk tiap lantai pada kondisi pembebanan ultimit untuk tiap model bangunan disajikan pada Tabel 12 berikut.

Tabel 12. Gaya Geser Kolom Antar Lantai pada Semua Model Bangunan

Model	Gaya Geser (kN)						
	Lantai 7	Lantai 6	Lantai 5	Lantai 4	Lantai 3	Lantai 2	Lantai 1
M-FB0	32,672	34,462	39,905	42,764	39,398	48,073	38,570
M-BI2	31,703	32,172	36,453	38,775	28,028	48,619	23,256
M-BI5	31,277	30,587	34,285	36,149	22,640	45,581	18,608
M-BI10	30,992	29,529	32,839	34,398	19,048	43,555	15,509
M-BI15	30,834	28,942	32,035	33,425	17,053	42,430	13,788
M-BI20	30,708	28,472	31,393	32,647	15,456	41,530	12,410
M-BI25	30,637	28,208	31,031	32,209	14,559	41,023	11,636
M-BI30	30,574	27,974	30,712	31,823	13,766	40,577	11,329

Gaya geser kolom yang terjadi di tiap lantai berdasarkan tingkat redaman efektif isolator dapat disajikan dalam format grafik yang ditampilkan pada Gambar 8 berikut.



Gambar 8. Grafik Gaya Geser Kolom Antar Lantai Berdasarkan Tingkat Redaman Efektif Isolator

Dari grafik momen dan gaya geser kolom antar lantai yang ditampilkan pada Gambar 7 dan Gambar 8 diatas, terlihat bahwa reduksi terjadi secara non-linear seiring dengan peningkatan tingkat redaman efektif isolator dan reduksi terbesar terjadi pada lantai 1 dengan persentase perbandingan model *base isolation* terhadap model *fixed base* sebagai berikut.

Tabel 13. Perbandingan Momen dan Gaya Geser Kolom Model Base Isolation Terhadap Model Fixed Base

Tingkat Redaman Efektif Isolator	2%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Perbandingan Momen Kolom Terhadap Fixed Base	-37,54%	-49,99%	-58,28%	-62,89%	-66,57%	-68,65%	-69,19%
Perbandingan Gaya Geser Kolom Terhadap Fixed Base	-39,70%	-51,75%	-59,79%	-64,25%	-67,82%	-69,83%	-70,63%

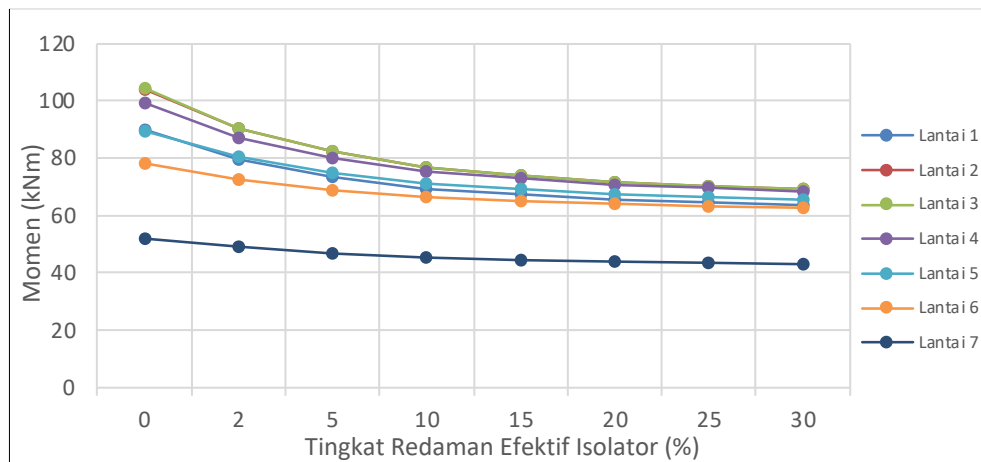
Momen dan Gaya Geser Balok Antar Lantai

Nilai momen balok antar lantai untuk tiap lantai pada kondisi pembebanan ultimit untuk tiap model bangunan disajikan pada Tabel 14 berikut.

Tabel 14. Momen Balok Antar Lantai pada Semua Model Bangunan

Model	Momen (kNm)						
	Lantai 7	Lantai 6	Lantai 5	Lantai 4	Lantai 3	Lantai 2	Lantai 1
M-FB0	52,046	78,163	89,570	99,181	104,493	103,860	89,656
M-BI2	49,261	72,724	80,373	87,021	90,133	90,116	79,599
M-BI5	46,921	68,941	74,821	80,023	82,208	82,160	73,507
M-BI10	45,361	66,418	71,120	75,357	76,925	76,857	69,445
M-BI15	44,494	65,017	69,064	72,766	73,990	73,910	67,189
M-BI20	43,800	63,896	67,419	70,692	71,642	71,553	65,383
M-BI25	43,410	63,266	66,494	69,526	70,322	70,227	64,368
M-BI30	43,066	62,709	65,678	68,497	69,156	69,057	63,472

Momen balok yang terjadi di tiap lantai berdasarkan tingkat redaman efektif isolator dapat disajikan dalam format grafik yang ditampilkan pada Gambar 9 berikut.



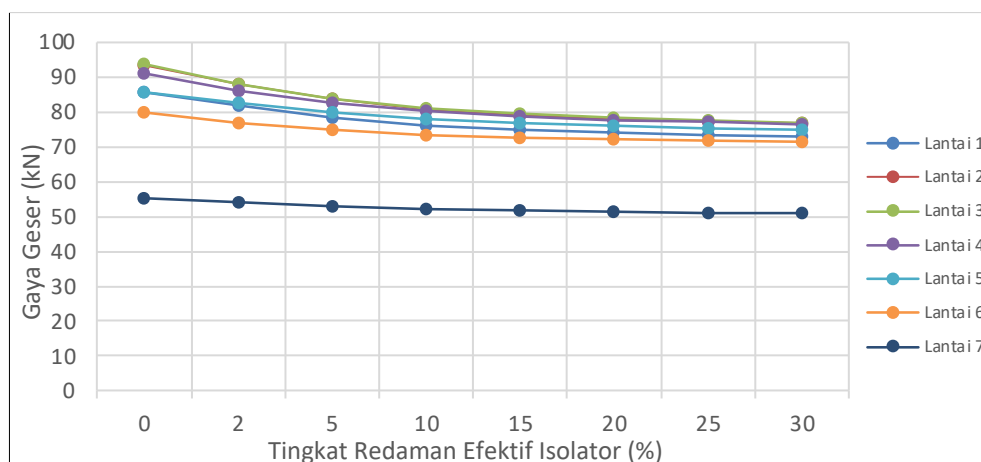
Gambar 9. Grafik Momen Balok Antar Lantai Berdasarkan Tingkat Redaman Efektif Isolator

Sedangkan nilai gaya geser kolom antar lantai untuk tiap lantai pada kondisi pembebanan ultimit untuk tiap model bangunan disajikan pada Tabel 15 berikut.

Tabel 15. Gaya Geser Kolom Antar Lantai pada Semua Model Bangunan

Model	Gaya Geser (kN)						
	Lantai 7	Lantai 6	Lantai 5	Lantai 4	Lantai 3	Lantai 2	Lantai 1
M-FB0	55,311	79,881	85,932	90,996	93,802	93,421	85,829
M-BI2	54,164	76,799	82,844	86,331	88,002	87,878	81,859
M-BI5	52,973	74,850	79,917	82,638	83,823	83,674	78,492
M-BI10	52,178	73,550	77,965	80,176	81,037	80,871	76,247
M-BI15	51,737	72,829	76,881	78,809	79,489	79,314	75,000
M-BI20	51,384	72,251	76,013	77,714	78,251	78,068	74,003
M-BI25	51,186	71,926	75,526	77,099	77,555	77,368	73,441
M-BI30	51,010	71,640	75,095	76,556	76,940	76,750	72,946

Gaya geser balok yang terjadi di tiap lantai berdasarkan tingkat redaman efektif isolator dapat disajikan dalam format grafik yang ditampilkan pada Gambar 10 berikut.



Gambar 10. Grafik Gaya Geser Balok Antar Lantai Berdasarkan Tingkat Redaman Efektif Isolator

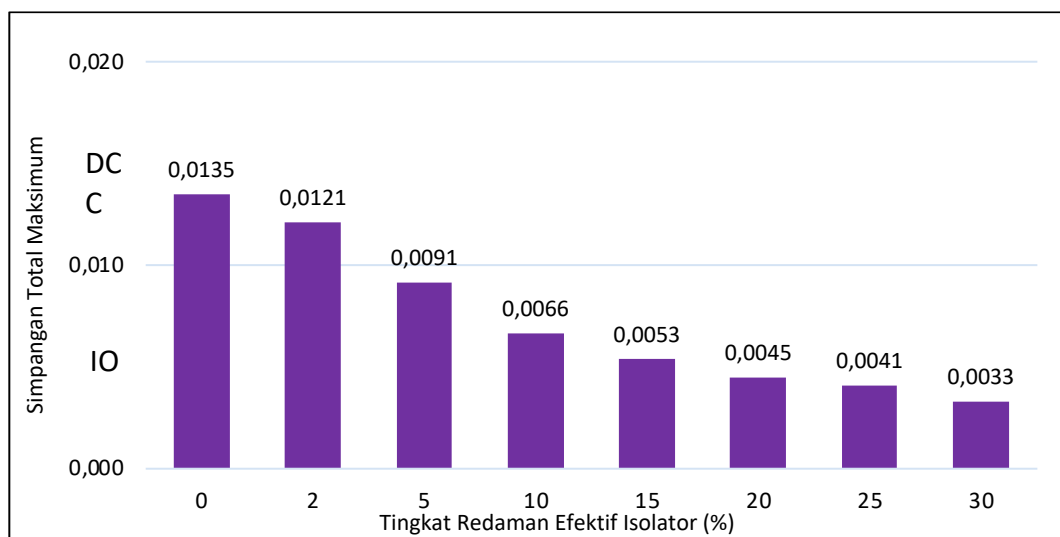
Dari grafik momen dan gaya geser balok antar lantai yang ditampilkan pada Gambar 9 dan Gambar 10 diatas, terlihat bahwa reduksi terjadi secara non-linear seiring dengan peningkatan tingkat redaman efektif isolator dan reduksi terbesar terjadi pada lantai 3 dengan persentase perbandingan model *base isolation* terhadap model *fixed base* sebagai berikut.

Tabel 16. Perbandingan Momen dan Gaya Geser Balok Model Base Isolation Terhadap Model Fixed Base

Tingkat Redaman Efektif Isolator	2%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Perbandingan Momen Balok Terhadap Fixed Base	-13,74%	-21,33%	-26,38%	-29,19%	-31,44%	-32,70%	-33,82%
Perbandingan Gaya Geser Balok Terhadap Fixed Base	-6,18%	-10,64%	-13,61%	-15,26%	-16,58%	-17,32%	-17,98%

Evaluasi Tingkat Kinerja Struktur Bangunan

Penentuan tingkat kinerja struktur menurut ketentuan ATC-40 didasarkan pada deformasi lateral yang terjadi ketika mencapai *performance point*. tingkat kinerja dapat diperoleh dengan menghitung *drift* total maksimum struktur sehingga dapat diklasifikasikan sesuai dengan tingkat kinerja yang ditentukan. Hasil analisis *pushover* menunjukkan nilai simpangan (*drift*) total maksimum sesuai dengan tingkat redaman efektif isolator yang disajikan pada Gambar 11 berikut.



Gambar 11. Grafik Perbandingan Simpangan Total Maksimum Berdasarkan Tingkat Redaman Efektif Isolator

Dari grafik perbandingan simpangan total maksimum diatas, terlihat bahwa model *fixed base* dan model *base isolation* dengan redaman isolator 2% memiliki tingkat kinerja *Damage Control* (DC) yang artinya bangunan masih mampu menahan gempa yang terjadi dan resiko korban jiwa manusia sangat kecil, sedangkan pada model *base isolation* dengan tingkat redaman isolator 5% hingga 30% telah mengalami peningkatan tingkat kinerja menjadi *Immediate Occupancy* (IO) yang artinya bangunan aman saat terjadi gempa, resiko korban jiwa dan kegagalan struktur tidak terlalu berarti, gedung tidak mengalami kerusakan berarti, dan dapat segera difungsikan kembali.

KESIMPULAN

1. Penggunaan *base isolator* pada model *base isolation* mampu mereduksi respon seismik struktur. Reduksi terjadi secara non-linear sejalan dengan kenaikan redaman efektif isolator, dimana dari tingkat redaman isolator 2% hingga 30%, gaya geser dasar mengalami reduksi sebesar 29,25% hingga 66,70%, perpindahan lantai maksimum tereduksi sebesar 41,20% hingga 72,35%, dan simpangan antar lantai maksimum mampu tereduksi sebesar 74,33% hingga 87,94%;
2. Pada analisis gaya-gaya dalam elemen struktural, diperoleh bahwa pada model *base isolation* gaya dalam akan mengalami reduksi secara non-linear seiring kenaikan redaman efektif isolator dari 2% hingga 30%, dimana momen dan gaya geser kolom berturut-turut tereduksi 37,54% - 69,19% dan 39,70% - 70,63%, sedangkan momen dan gaya geser balok berturut-turut tereduksi sebesar 13,74% - 33,82% dan 6,18% - 17,98%;
3. Dari pola grafik yang terbentuk, terlihat penurunan yang cukup signifikan terjadi tingkat redaman isolator 0% hingga 20% sedangkan pada tingkat redaman isolator 20% hingga 30% pola penurunannya semakin insignifikan, Sehingga, dapat dikatakan bahwa pada tingkat redaman efektif isolator 20% sudah cukup optimum dan efisien dalam mereduksi respon-strukstur yang terjadi;
4. Berdasarkan hasil analisis tingkat kinerja struktur berdasarkan ATC-40, diperoleh bahwa penggunaan *base isolator* mampu meningkatkan level kinerja struktur dimana pada struktur *fixed base* memiliki level *Damage Control (DC)*, meningkat menjadi level *Immediate Occupancy (IO)* pada struktur *base isolation*.

Daftar Pustaka

- Andrian, W., Faimun, F., & Wahyuni, E. (2017). Evaluasi Kinerja Gedung Menggunakan Base Isolation Tipe High Damping Rubber Bearing (HDRB) Pada Modifikasi Gedung J-Tos Jogjakarta Dengan Perencanaan Analisa Pushover. *Jurnal Teknik ITS*, 6(2). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v6i2.26356>
- ATC-40. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. California: Applied Technology Council.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung SNI 1726:2019*. Jakarta: BSN.
- Gabriel, G. (2022). Perbandingan Pengaruh High Damping Rubber Bearing Dan Lead Rubber Bearing Terhadap Kinerja Struktur. *Praxis: Jurnal Sains, Teknologi, Masyarakat Dan Jejaring* |, 4(2), 158–166.
- Hasdanita, F., Afifuddin, M., & Muttaqin, M. (2018). Analisis Pushover Terhadap Respon Struktur Dengan Menggunakan Base Isolator. *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil Dan Perencanaan*, 1(1), 169–178. <https://doi.org/10.24815/jarsp.v1i1.10374>
- Naeim, F., & Kelly, M. J. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Nggaba, D. N., Simatupang, P. H., & Rizal, A. H. (2021). Base Shear Struktur Beton Bertulang Yang Menggunakan Base Isolator Akibat Beban Gempa Dengan Menggunakan Etabs. *JURNAL FORUM TEKNIK SIPIL (J-ForTekS)*, 1(1), 13–23. <https://doi.org/10.35508/forteks.v1i1.4068>
- Tavio, & Wijaya, U. (2018). *Desain Rekayasa Gempa Berbasis Kinerja (Performanced Based Design)*. Yogyakarta: ANDI.