

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengecekan Struktur Bangunan Eksisting

Struktur eksisting yang telah dimodelkan perlu untuk cek terhadap standar dan persyaratan yang berlaku. Pengecekan kondisi struktur bangunan eksisting untuk mengetahui sejauh mana kemampuan elemen-elemen struktur dalam menahan beban gravitasi dan beban lateral gempa sebelum dilakukan analisis perkuatan (*retrofitting*). Analisis meliputi pengecekan kapasitas elemen struktur, pembentukan sendi plastis, pola distribusi gaya lateral, nilai simpangan antar lantai yang terjadi akibat pembebanan gempa, serta pengaruh p-delta. Hasil pushover analysis pada kondisi eksisting kemudian dikonversikan menjadi kurva kapasitas dan spektrum kapasitas untuk menentukan titik kinerja (*Performance Point*). Nilai perpindahan dan *drift* pada titik tersebut selanjutnya dipetakan ke dalam batas kerusakan (*damage state*) berdasarkan parameter HAZUS sehingga dapat diperoleh kurva fragilitas bangunan eksisting.

4.1.1 Faktor Skala Gempa

Berdasarkan tabel 12 SNI 1726:2019, skala gempa perlu disesuaikan dengan sistem struktur yang digunakan. Adapun nilai koefisien modifikasi respons dapat dilihat pada Tabel berikut.

Tabel 4.1 Koefisien Modifikasi Respons

C. Sistem rangka pemikul momen								
1. Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	5½	TB	TB	48	30	TI
3. Rangka baja pemikul momen menengah	4½	3	4	TB	TB	10 ^k	TI ^k	TI ^k
4. Rangka baja pemikul momen biasa	3½	3	3	TB	TB	TI ⁱ	TI ⁱ	TI ⁱ
5. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus ^m	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
7. Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
8. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
9. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
10. Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen	6	3	5½	48	48	30	TI	TI
11. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
12. Rangka baja canal dingin pemikul momen khusus dengan pembautan ⁿ	3½	3 ^o	3½	10	10	10	10	10
D. Sistem ganda dengan rangka pemikul momen khusus yang mampu menahan paling sedikit 25 % gaya seismik yang ditetapkan								
1. Rangka baja dengan bresing eksentris	8	2½	4	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka baja dengan bresing konsentris khusus	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB
3. Dinding geser beton bertulang khusus ^h	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB
4. Dinding geser beton bertulang biasa ^g	6	2½	5	TB	TB	TI	TI	TI

Faktor skala dihitung menggunakan persamaan :

$$EQ = G \times I_e / R \quad \text{Persamaan 1}$$

Dimana nilai R adalah koefisien modifikasi respons, $R = 8$. G adalah percepatan gravitasi sebesar $9806,65 \text{ mm/s}^2$, I_e adalah faktor keutamaan gempa sesuai dengan kategori risiko bangunan pendidikan (IV), maka $I_e = 1,5$.

$$EQ = G \times I_e / R$$

$$= 9806,65 \times 1,5 / 8$$

$$EQ = 1838,75 \text{ mm/s}^2$$

4.1.2 Periode Fundamental

- a. Tentukan periode fundamental perkiraan

$$T_a = C_t h n^x \quad \text{Persamaan 2}$$

$h n$ merupakan tinggi dari strukturnya koefisien C_t dan x ditentukan berdasarkan tabel berikut.

Tabel 4.2 Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x

Tipe Struktur	C_t	x
Sistem rangka pemikul momen di mana rangka memikul 100 % gaya seismik yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya seismik:		
• Rangka baja pemikul momen	0,0724	0,8
• Rangka beton pemikul momen	0,0466	0,9
Rangka baja dengan bresing eksentris	0,0731	0,75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0,0731	0,75
Semua sistem struktur lainnya	0,0488	0,75

Sumber : SNI 1726:2019

Berdasarkan tabel diatas untuk tipe struktur nilai yang ditentukan adalah sebagai berikut.

$$C_t = 0,0488$$

$$x = 0,75$$

$$h_n = 23 \text{ m}$$

Maka :

$$T_a = 0,0488 \times 0,75^{23}$$

$$\mathbf{T_a = 0,513 \text{ detik}}$$

- b. Tentukan nilai koefisien batas atas periode (C_u)

$$SD1 = 0,66025$$

Berdasarkan tabel 4.3, nilai C_u adalah 1,4, adapun tabel koefisien batas atas pada periode dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4.3 Koefisien untuk batas atas pada periode yang dihitung

Parameter percepatan respons spektral desain pada 1 detik, S_{D1}	Koefisien C_u
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\leq 0,1$	1,7

- c. Tentukan nilai yang digunakan (T)

$$\text{Jika } T_c > C_u T_a \rightarrow \text{Gunakan } T = C_u T_a$$

$$\text{Jika } T_a < T_c < T_u C_a \rightarrow \text{Gunakan } T = T_c$$

$$\text{Jika } T_c < T_a \rightarrow \text{Gunakan } T = T_a$$

Tabel 4.4 Nilai periode keluaran SAP 2000 Banunan Eksisting

Step Type	Step Num	Period	UX	UY	RZ
		sec			
Mode	1	0.981749	0.56038	0.16974	0.10141
Mode	2	0.960803	0.25456	0.44866	0.10841

Tabel 4.5 Periode Fundamental Arah X – Bangunan Eksisting

PERIODE/WAKTU GETAR ARAH X		
T_a	< T Program <	
$C_t \times h^x$	< T Program <	$T_a \times C_u$
0,513	0,981749	0,7175
Maka digunakan T = 0,7175		

Tabel 4.6 Periode Fundamental Arah Y – Bangunan Eksisting

PERIODE/WAKTU GETAR ARAH X		
T_a	< T Program <	
$C_t \times h^x$	< T Program <	$T_a \times C_u$
0,513	0,785158	0,7175
Maka digunakan T = 0,7175		

4.1.3 Pemeriksaan Jumlah Ragam

Menurut SNI 1726:2019 Pasal 7.9.1.1, analisis struktur harus mencakup jumlah mode getar yang cukup agar total partisipasi massa gabungan mencapai minimal 90% dari massa aktual pada masing-masing arah horizontal ortogonal yang dianalisis dalam model.

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
MODAL	Mode	1	0.581749	0.56038	0.16974	1.334E-06	0.56038	0.16974	1.334E-06	0.03664	0.03401	0.10141	0.03664	0.03401	0.10141
MODAL	Mode	2	0.960803	0.25456	0.44866	2.629E-06	0.81494	0.6184	3.962E-06	0.08827	0.01648	0.10841	0.12491	0.05049	0.20981
MODAL	Mode	3	0.785158	0.00436	0.20391	6.678E-07	0.8193	0.82231	4.63E-06	0.00676	0.00049	0.60043	0.13169	0.05086	0.81825
MODAL	Mode	4	0.32948	0.12007	0.00012	1.635E-07	0.93937	0.82243	4.794E-06	0.00016	0.00016	0.0002	0.13187	0.13581	0.81845
MODAL	Mode	5	0.317237	0.00017	0.10232	5.171E-06	0.93954	0.92475	9.965E-06	0.17357	3.633E-05	0.62956	0.30544	0.13585	0.94801
MODAL	Mode	6	0.275981	2.106E-06	0.02304	8.345E-08	0.93954	0.94776	1.005E-05	0.03567	0.039E-05	0.09586	0.3411	0.13593	0.94387
MODAL	Mode	7	0.189675	0.03734	4.127E-08	4.197E-05	0.97680	0.94776	5.202E-05	7.817E-06	0.00958	0.00033	0.34111	0.14551	0.9442
MODAL	Mode	8	0.183364	0.00026	0.02268	1.883E-05	0.97714	0.97946	7.085E-05	0.0142	6.528E-05	0.00154	0.35531	0.14558	0.94574
MODAL	Mode	9	0.169504	0.00038	0.0063	0.00023	0.97752	0.97677	0.0003	0.00067	0.00031	0.02035	0.35580	0.14588	0.96609
MODAL	Mode	10	0.169178	0.00015	0.0029	0.00084	0.97766	0.97967	0.00114	0.00593	0.00188	0.00006	0.36191	0.14776	0.97215
MODAL	Mode	11	0.141597	1.553E-07	3.802E-05	0.00003	0.97766	0.97971	0.00717	0.0138	3.771E-05	3.225E-05	0.37571	0.1478	0.97218
MODAL	Mode	12	0.128168	0.00031	0.001	0.13002	0.97797	0.9807	0.13719	0.04532	0.02136	0.00068	0.42104	0.16916	0.97286
MODAL	Mode	13	0.127451	0.00708	0.00553	0.0161	0.98505	0.98623	0.15329	0.01558	0.268E-05	0.00544	0.43662	0.16922	0.9783
MODAL	Mode	14	0.124475	0.00928	0.00664	0.00082	0.99434	0.99287	0.15412	0.0114	0.0057	0.00489	0.44802	0.17492	0.98299
MODAL	Mode	15	0.122591	1.774E-09	5.996E-06	0.0013	0.99434	0.99288	0.15542	0.138E-05	0.01566	1.383E-06	0.44811	0.19058	0.98299

Gambar 4.1 Jumlah Ragam Participation Mass ratios (Bangunan Eksisting)

Setelah ditampilkan hasil partisipasi massa pada Gambar 4.1, berikut disajikan Tabel 4.1 yang menunjukkan rincian nilai partisipasi massa pada setiap mode getar.

Tabel 4.7 Modal Participating Mass Ratios (Bangunan Eksisting)

Output Case	Step Type	Step Num	Period	UX	UY	SUM UX	SUM UY	RZ	SUM RZ
			sec						
MODAL	Mode	1	0.981749	0.56038	0.16974	56%	17%	0.10141	10%
MODAL	Mode	2	0.960803	0.25456	0.44866	81%	62%	0.10841	21%
MODAL	Mode	3	0.785158	0.00436	0.20391	82%	82%	0.60843	82%
MODAL	Mode	4	0.32948	0.12007	0.00012	94%	82%	0.0002	82%
MODAL	Mode	5	0.317237	0.00017	0.10232	94%	92%	0.02956	85%
MODAL	Mode	6	0.275981	2.11E-06	0.02304	94%	95%	0.09586	94%
MODAL	Mode	7	0.189875	0.03734	4.127E-08	98%	95%	0.00033	94%
MODAL	Mode	8	0.183364	0.00026	0.02268	98%	97%	0.00154	95%
MODAL	Mode	9	0.169504	0.00038	0.0063	98%	98%	0.02035	97%
MODAL	Mode	10	0.169178	0.00015	0.0029	98%	98%	0.00606	97%
MODAL	Mode	11	0.141597	1.55E-07	0.00003802	98%	98%	3.23E-05	97%
MODAL	Mode	12	0.128168	0.00031	0.001	98%	98%	0.00068	97%
MODAL	Mode	13	0.127451	0.00708	0.00553	99%	99%	0.00544	98%
MODAL	Mode	14	0.124475	0.00928	0.00664	99%	99%	0.00469	98%
MODAL	Mode	15	0.122591	1.77E-09	0.000005996	99%	99%	1.38E-06	98%

Berdasarkan Tabel 4.7, dapat dilihat bahwa nilai partisipasi massa pada masing-masing arah getar, yaitu translasi arah X (UX), translasi arah Y (UY), serta rotasi terhadap sumbu vertikal (RZ), mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya jumlah mode yang diperhitungkan.

Pada mode pertama, partisipasi massa didominasi oleh arah X dengan nilai UX sebesar 0,56038, sedangkan partisipasi arah Y sebesar 0,16974. Mode kedua menunjukkan dominasi partisipasi massa pada arah Y (UY = 0,44866). Sementara itu, mode ketiga memperlihatkan kontribusi rotasi yang relatif signifikan dengan nilai RZ = 0,60843, yang menandai bahwa mode tersebut terutama merepresentasikan gerakan rotasi bangunan.

Seiring bertambahnya mode, nilai kumulatif partisipasi massa (SUM UX, SUM UY, dan SUM RZ) terus meningkat. Pada mode ke-15, total partisipasi massa telah mencapai SUM UX = 99%, SUM UY = 99%, dan SUM RZ = 98%, sehingga ketiganya telah melampaui batas minimum 90% partisipasi massa sebagaimana disyaratkan oleh SNI 1726:2019 Pasal 7.9.1.1 untuk arah translasi X dan Y. Walaupun SNI tidak mensyaratkan nilai minimum partisipasi massa untuk arah rotasi, hasil analisis menunjukkan bahwa distribusi rotasi juga telah memenuhi tingkat representasi modal yang memadai.

Dengan demikian, jumlah mode yang digunakan dalam analisis ini sudah mencukupi untuk menggambarkan respons dinamis struktur secara akurat, baik pada arah translasi X, translasi Y, maupun rotasi terhadap sumbu vertikal (RZ). Hasil ini memastikan bahwa prosedur analisis modal yang dilakukan telah sesuai dengan ketentuan peraturan dan dapat digunakan sebagai dasar untuk analisis respons berikutnya.

a. Mode Shape 1 Translasi

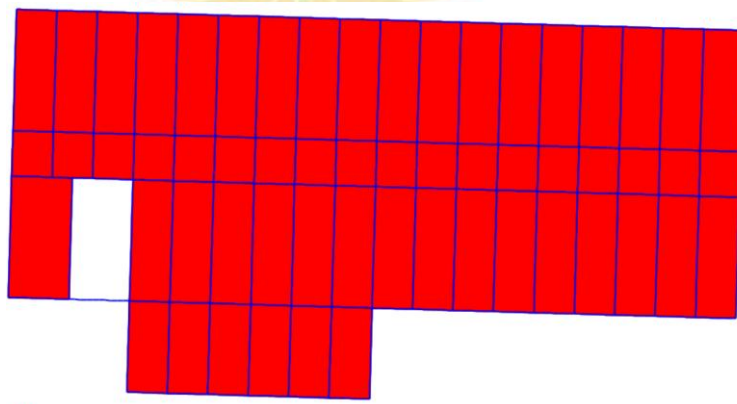
Dari **Tabel 4.7** diatas dapat diperhatikan bahwa bentuk ragam pertama nilai UX dominan dibandingkan UY dan RZ, nilai tersebut menunjukkan bahwa struktur translasi ke arah X.



Gambar 4.2 Mode Shape 1 Translasi

b. Mode Shape 2 Translasi

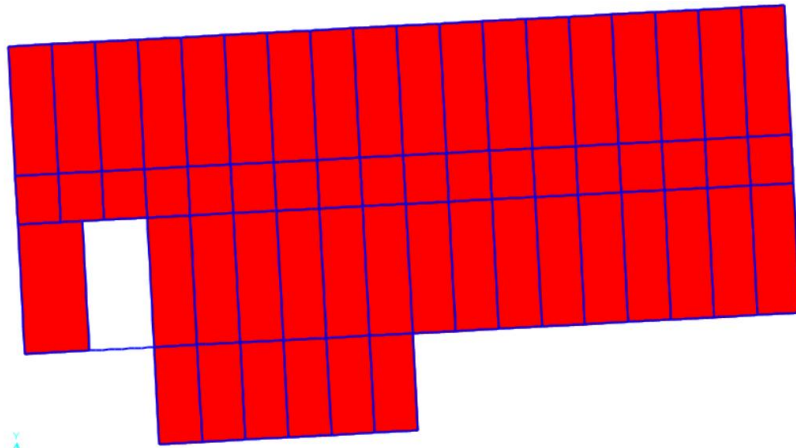
Dari **Tabel 4.7** diatas dapat diperhatikan bahwa bentuk ragam kedua nilai UY dominan dibandingkan UX dan RZ, nilai tersebut menunjukkan bahwa struktur translasi ke arah Y.



Gambar 4.3 Mode Shape 2 Translasi

c. Mode Shape 3 Rotasi

Dari **Tabel 4.7** diatas dapat diperhatikan bahwa bentuk ragam ketiga nilai RZ dominan dibandingkan UX dan UY, nilai tersebut menunjukkan bahwa struktur mengalami rotasi.

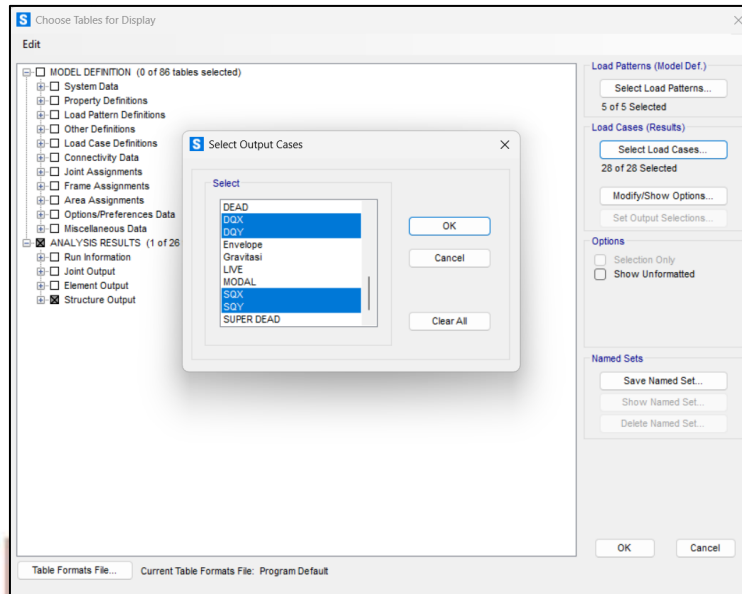


Gambar 4.4 Mode Shape 3 Rotasi

4.1.4 Perbandingan Geser Dasar V_{Statik} VS V_{Dinamik}

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.9.1.4 tentang skala gaya, dijelaskan bahwa gaya geser dasar hasil analisis dinamik harus lebih besar dari 100% gaya geser dasar statik, dengan persamaan $V_D > 100\% V_S$ atau juga bisa mengikuti persyaratan $V_{\text{dinamik}} \geq V_{\text{statik}}$. Apabila kondisi tersebut belum terpenuhi, maka perlu dilakukan penyesuaian skala gaya pada model struktur gedung.

Untuk memeriksa apakah ketentuan tersebut sudah dipenuhi oleh struktur yang dimodelkan, langkah-langkahnya adalah dengan memilih menu *Run* → *Display* → *Show Table*. Pada kotak dialog *Choose Tables for Display*, pilih *Analysis Result* → *Structure Output* → *Base Reactions* → *Table: Base Reactions*, kemudian pada opsi *Load Cases (Results)*, pilih *DQX*, *DQY*, *SQX*, dan *SQY*.



Gambar 4.5 Seleksi Load Case Perhitungan Geser Dasar (Eksisting)

TABLE: Base Reactions				
OutputCase	CaseType	StepType	GlobalFX	GlobalFY
Text	Text	Text	KN	KN
SQX	LinStatic		-12505.36	0.00
SQY	LinStatic		0.00	-12777.97
DQX	LinRespSpe	Max	10177.69	1287.80
DQY	LinRespSpe	Max	1287.80	8879.26

Gambar 4.6 Output Geser Dasar

Tabel 4.8 Base Reaction Statik dan Dinamik

TABEL BASE REACTION				
Output Case	Case Type	Step Type	Global FX	Global FY
			kN	kN
SQX	Linear Static		-12505.36	0.00
SQY	Linear Static		0.00	-12777.97
DQX	Linear Respons Spectrum	Max	10177.69	1287.80
DQY	Linear Respons Spectrum	Max	1287.80	8879.26

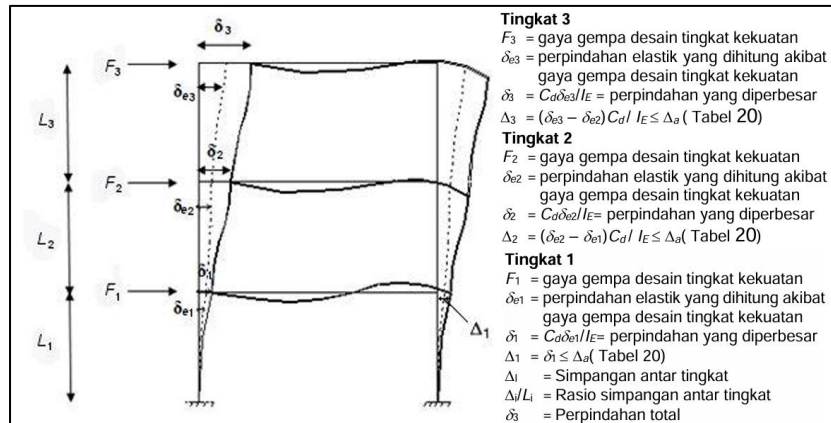
Tabel 4.9 Hasil Perhitungan Geser Dasar(Bangunan Eksisting)

Gaya Gempa	V _x	V _y
Statik	12505,36	12777,97
Dinamik	10177,69	8879,26
V _{statik} ≥ V _{dinamik} (NOT OK)		
V _{statik} / V _{dinamik}	1,23	1,44
Scale Faktor Awal	1.8394	1.8394
Scale Faktor Koreksi	2259.58	2646.47
Hasil Scale		
Statik	12505,36	12777,97
Dinamik	12505,36	12777,97
V _{statik} ≥ V _{dinamik} (OK)		

Hasil perhitungan awal menunjukkan bahwa nilai gaya geser dasar statik masih lebih besar dari gaya geser dasar dinamik, sehingga belum memenuhi ketentuan SNI. Oleh karena itu, dilakukan penskalaan respons spektrum menggunakan faktor skala awal dan faktor skala koreksi. Setelah proses penskalaan, diperoleh nilai gaya geser dasar dinamik yang telah disesuaikan sehingga memenuhi persyaratan **V dinamik ≥ V statik** sesuai dengan ketentuan SNI 1726:2019.

4.1.5 Pemeriksaan Simpangan Antar Tingkat (Story Drift) – Bangunan Eksisting

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.8.6, simpangan antar tingkat desain (Δ) ditentukan dari selisih defleksi antara pusat massa lantai atas dan pusat massa lantai di bawahnya pada tingkat yang dianalisis. Nilai simpangan ini digunakan untuk menilai kinerja deformasi struktur terhadap beban gempa. Proses penentuan tersebut dapat digambarkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Penentuan Simpangan Antar Tiingkat
Sumber : SNI 1726:2019

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.12.1, simpangan antar tingkat desain tidak diperbolehkan melebihi simpangan antar tingkat yang diizinkan, sebagaimana nilai batasnya tercantum pada Tabel 4.10. Ketentuan ini bertujuan untuk memastikan agar deformasi antar lantai tetap dalam batas aman dan tidak menimbulkan kerusakan struktural maupun non-struktural yang berlebihan pada bangunan.

Tabel 4.10 Simpangan Antar Tingkat Izin

Struktur	Kategori Risiko		
	I atau II	III	IV
Struktur, selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar tingkat.	0,025 hsxc	0,020 hsx	0,015 hsx
Struktur dinding geser kantilever batu bata	0,010 hsx	0,010 hsx	0,010 hsx
Struktur dinding geser batu bata lainnya	0,007 hsx	0,007 hsx	0,007 hsx
Semua struktur lainnya	0,020 hsx	0,015 hsx	0,010 hsx

Sumber : SNI 1726 : 2019

Untuk sistem rangka pemikul momen pada struktur dengan Klasifikasi Desain Seismik (KDS) D dan kategori risiko IV, nilai simpangan antar tingkat desain tidak boleh melebihi batas Δ_a / ρ pada setiap tingkat

bangunan. Oleh karena itu, nilai simpangan antar lantai ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta x = \frac{\delta \delta \times Cd}{I} < \Delta_a \quad \text{Persamaan 3}$$

$$\Delta_a = \frac{0,015 \, h x}{\rho} \quad \text{Persamaan 4}$$

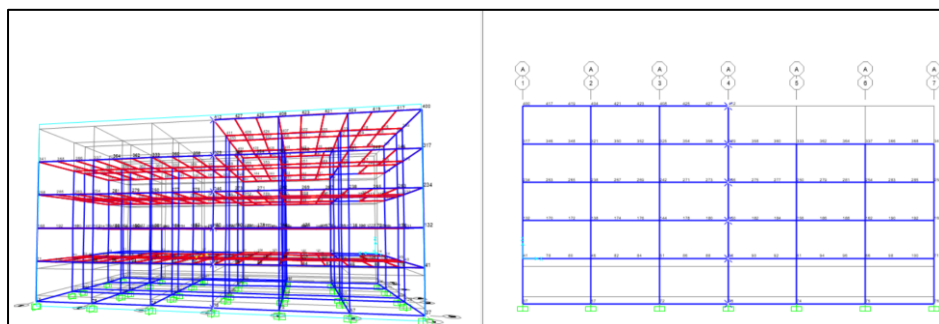
Keterangan :
 Δx = Simpangan Antar Tingkat
 Δ_a = Simpangan Ijin
 δ = Defleksi Yang Terjadi
 I = Faktor Keutamaan Gempa
 Cd = Faktor Pembesaran Defleksi

Sebelum menampilkan hasil defleksi yang terjadi pada struktur, langkah pertama yang perlu dilakukan adalah menampilkan nomor joint pada model. Tampilan hasil penomoran joint dapat dilihat pada Gambar 4.9.



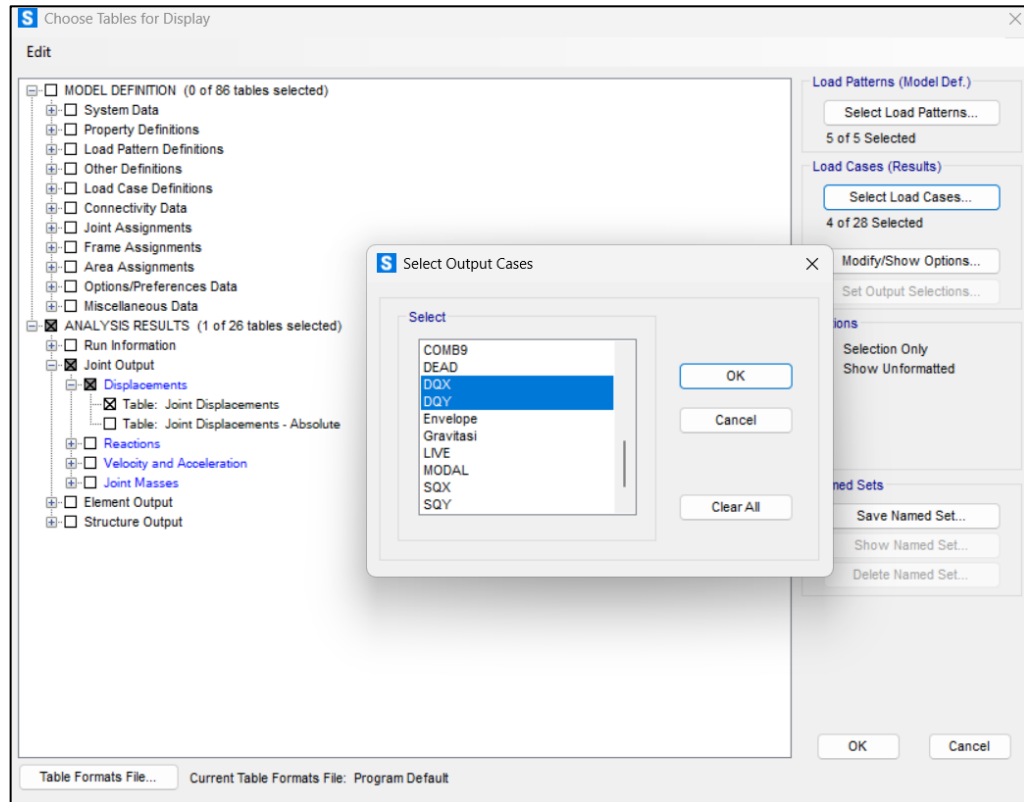
Gambar 4.8 Set Display Option Labels

Pada masing-masing lantai akan keluar joint seperti pada Gambar 4.9 dan pilih joint yang akan ditinjau (pada contoh ini dipilih joint dan klik pada pojok kanan atas sampai lantai bawah).



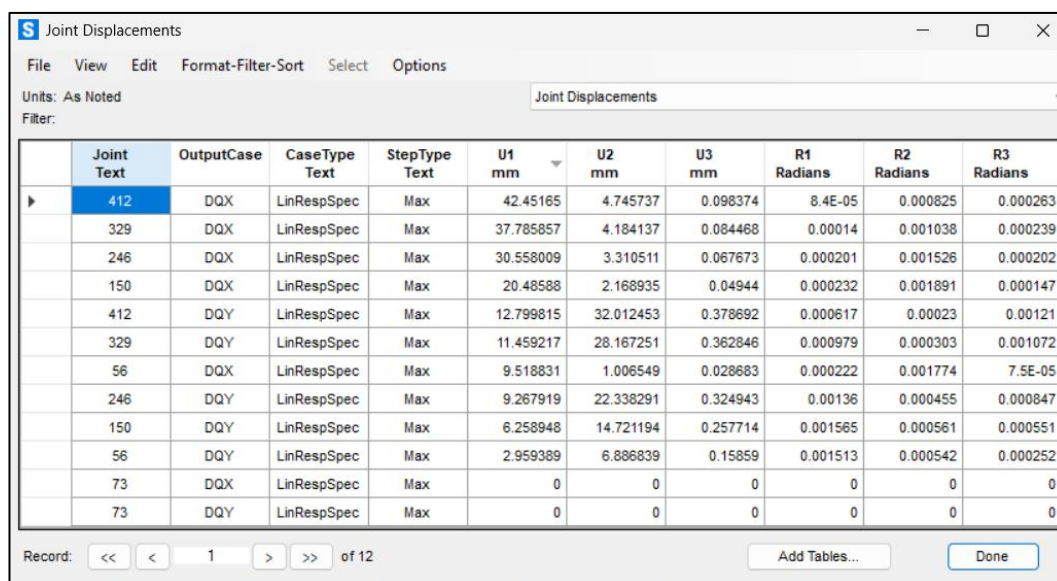
Gambar 4.9 Titik Lokasi Label Yang Ditinjau

Untuk melihat defleksi yang terjadi, dengan terlebih dahulu mengganti satuan jarak menjadi mm. klik **Run – Display – Show Table** Pada **option Analysis Result** pilih **Joint Output – Displacements – Table : Joint Displacements.** dan pada **option Load Cases (Results)** pilih **DX & DY.** Seperti pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11



Gambar 4.10 Pilihan Untuk Menampilkan Tabel Joint Displacement





The screenshot shows a software window titled 'Joint Displacements'. It contains a table with columns: Joint Text, OutputCase, CaseType Text, StepType Text, U1 mm, U2 mm, U3 mm, R1 Radians, R2 Radians, and R3 Radians. The table lists results for joints 412, 329, 246, 150, and 73 across different cases (DQX, DQY) and step types (Max). The bottom of the window shows 'Record: 1 of 12' and buttons for 'Add Tables...' and 'Done'.

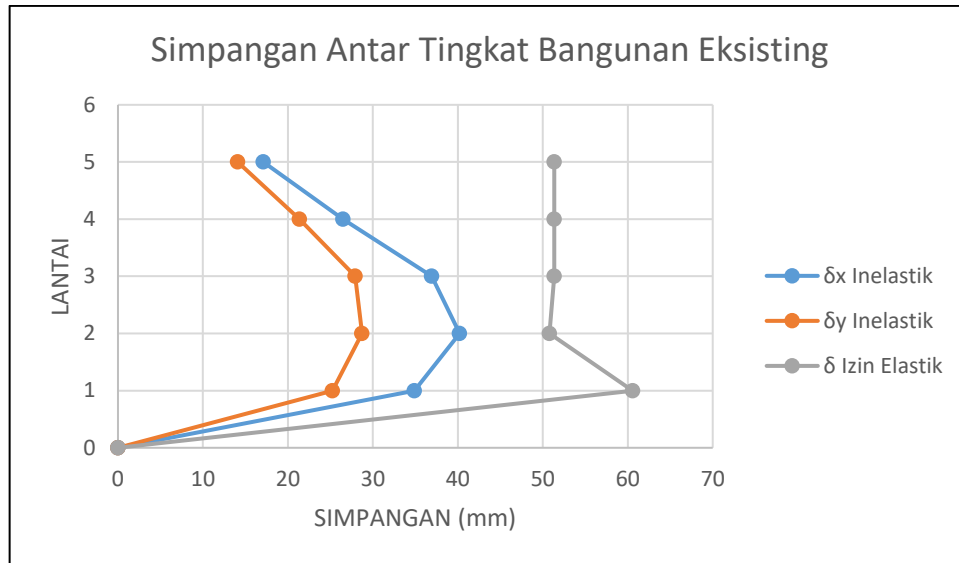
Joint Text	OutputCase	CaseType Text	StepType Text	U1 mm	U2 mm	U3 mm	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
412	DQX	LinRespSpec	Max	42.45165	4.745737	0.098374	8.4E-05	0.000825	0.000263
329	DQX	LinRespSpec	Max	37.785857	4.184137	0.084468	0.00014	0.001038	0.000239
246	DQX	LinRespSpec	Max	30.558009	3.310511	0.067673	0.000201	0.001526	0.000202
150	DQX	LinRespSpec	Max	20.48588	2.168935	0.04944	0.000232	0.001891	0.000147
412	DQY	LinRespSpec	Max	12.799815	32.012453	0.378692	0.000617	0.00023	0.00121
329	DQY	LinRespSpec	Max	11.459217	28.167251	0.362846	0.000979	0.000303	0.001072
56	DQX	LinRespSpec	Max	9.518831	1.006549	0.028683	0.000222	0.001774	7.5E-05
246	DQY	LinRespSpec	Max	9.267919	22.338291	0.324943	0.00136	0.000455	0.000847
150	DQY	LinRespSpec	Max	6.258948	14.721194	0.257714	0.001585	0.000561	0.000551
56	DQY	LinRespSpec	Max	2.959389	6.886839	0.15859	0.001513	0.000542	0.000252
73	DQX	LinRespSpec	Max	0	0	0	0	0	0
73	DQY	LinRespSpec	Max	0	0	0	0	0	0

Gambar 4.11 Tabel Joint Displacement

Tabel 4.11 Simpangan Antar Tingkat Bangunan Eksisting

Lantai	h (mm)	Displacement		δx Inelastik (mm)	δy Inelastik (mm)	δ Izin Inelastik (mm)	Cek
		δx (mm)	δy (mm)				
5	4450	4.666	3.845	17.108	14.099	50.769	OK
4	4450	7.228	5.829	26.502	21.373	51.346	OK
3	4450	10.072	7.617	36.931	27.929	51.346	OK
2	4400	10.967	7.834	40.213	28.726	50.769	OK
1	5250	9.519	6.887	34.902	25.252	60.577	OK
0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	OK

Simpangan antar tingkat (*story drift*) bangunan eksisting pada masing-masing lantai berdasarkan hasil analisis gempa. Nilai simpangan arah X (δx) dan arah Y (δy) digunakan untuk menentukan simpangan inelastik dengan memperhitungkan faktor modifikasi respons struktur. Berdasarkan hasil perbandingan, seluruh lantai menunjukkan nilai simpangan inelastik yang lebih kecil dari simpangan izin inelastik, sehingga kinerja struktur bangunan eksisting dinyatakan memenuhi persyaratan (OK) terhadap batasan simpangan antar tingkat menurut SNI 1726:2019.



Gambar 4.12 Simpangan Antar Tingkat Bangunan Eksisting

4.1.6 Pengecekan Pengaruh P-Delta Bangunan Eksisting

Sesuai dengan pasal 7.9.1.6 SNI 1726:2019, pengaruh P-Delta harus ditentukan dengan persamaan 45 pada pasal 7.8.7 SNI 1726:2019 sama dengan atau kurang dari 0,10.

$$\theta = \frac{P_x \Delta I_e}{V_x h_{sx} C_d}$$

Persamaan 5

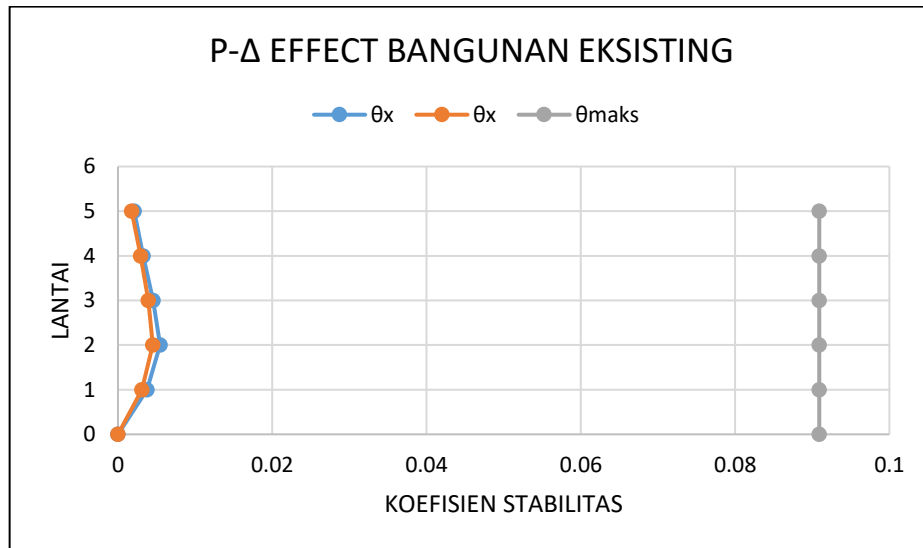
Dengan menggunakan hasil output dari SAP2000, perhitungan pengaruh P-Delta pada bangunan eksisting dirangkum pada tabel berikut.

Tabel 4.12 P-Delta Bagunan Eksisting

Story	h	δx	δy	Vx	Vy	P	θx	θy	θmaks	CEK
	(mm)	(mm)	(mm)	(kN)	(kN)	(kN)				
5	4450	4.666	3.845	2159.23	2083.05	15604.60	0.0021	0.0018	0.091	OK
4	4450	7.228	5.829	5104.47	4582.64	37644.42	0.0033	0.0029	0.091	OK
3	4450	10.072	7.617	7514.30	6599.73	55439.72	0.0046	0.0039	0.091	OK
2	4400	10.967	7.834	8437.99	7291.23	67749.02	0.0055	0.0045	0.091	OK
1	5250	9.519	6.887	10400.47	9073.62	79072.92	0.0038	0.0031	0.091	OK
0	0	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.091	OK

Pemeriksaan dilakukan menggunakan parameter stabilitas θ (theta) yang merupakan pengaruh gaya aksial vertikal (P) dan simpangan lateral struktur terhadap stabilitas bangunan. Nilai θ pada arah X (θ_x) dan arah Y

(θ_y) pada setiap tingkat dibandingkan dengan nilai θ maksimum (θ_{maks}) sesuai ketentuan SNI 1726:2019. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa seluruh nilai θ lebih kecil dari θ_{maks} , sehingga pengaruh efek P-Delta masih dalam batas yang diizinkan dan struktur bangunan eksisting dinyatakan stabil serta memenuhi persyaratan SNI 1726:2019



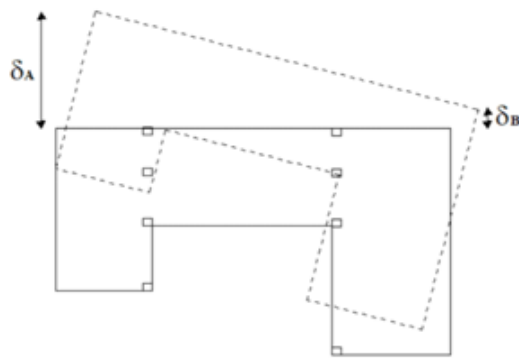
Tabel 4.13 P-Delta Bangunan Eksisting

4.1.7 Pemeriksaan Ketidakberaturan Horizontal Bangunan Eksisting

Pengecekan ketidakberaturan horizontal dan vertikal berdasarkan (SNI 1726:2019, 2019) pada Pasal 7.3.2. Terdapat beberapa pemeriksaan ketidakberaturan horizontal yang harus diperhatikan dalam perencanaan bangunan, antara lain:

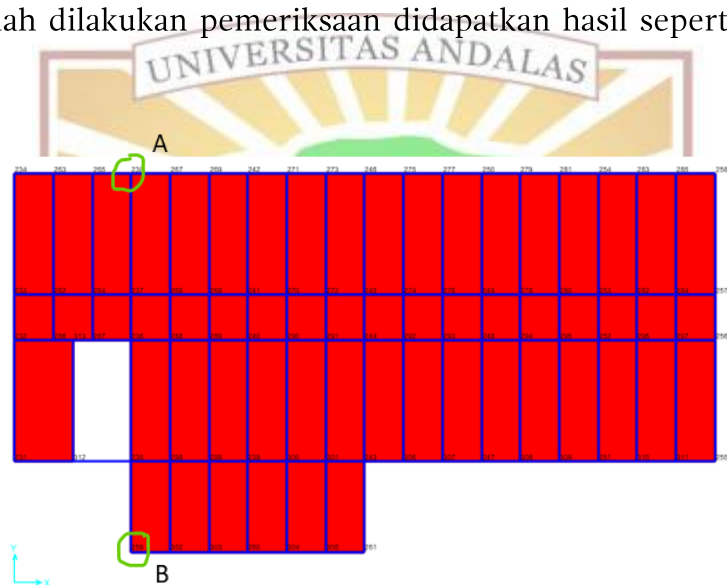
4.1.7.1 Ketidakberaturan Torsi dan Torsi Berlebihan

Dalam tabel 13 SNI 1726:2019, ketidakberaturan torsi berlaku apabila simpangan antar tingkat maksimum pada suatu ujung struktur lebih dari 1,2 kali simpangan antar tingkat rata-rata dan termasuk torsi berlebihan jika melebihi 1,4 kali dari simpangan antar tingkat rata-rata.

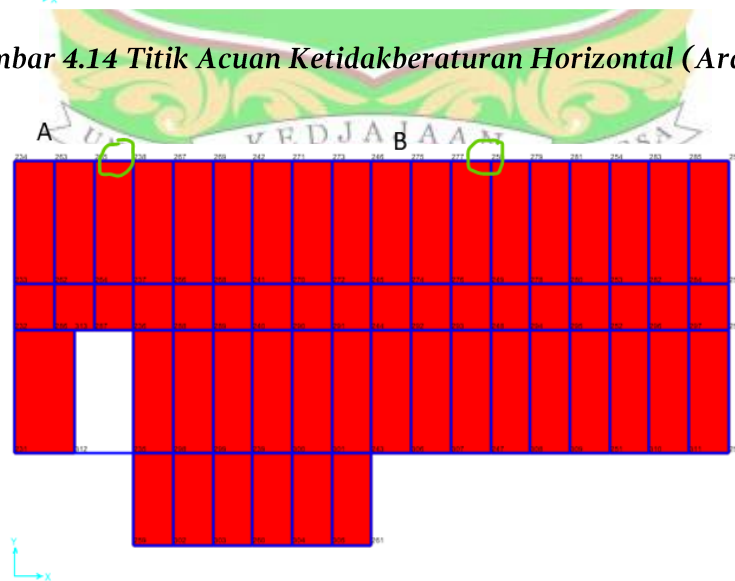


Gambar 4.13 Ketidakberaturan Horizontal : Torsi

Setelah dilakukan pemeriksaan didapatkan hasil seperti pada tabel dibawah.



Gambar 4.14 Titik Acuan Ketidakberaturan Horizontal (Arah X)



Gambar 4.15 Titik Acuan Ketidakberaturan Horizontal (Arah Y)

Tabel 4.14 Pengecekan Ketidakberaturan Torsi (Arah X)

Arah X									
Lantai	Displacement (mm)		Simpangan Antar Tingkat (mm)		Δ_{Avg} (mm)	Δ_{Max} (mm)	$\Delta_{avg}/\Delta_{max}$	Cek Tipe 1a	Cek Tipe 1b
	δA	δB	ΔA	ΔB					
5	55.241	48.364	6.764	5.931	6.348	6.764	0.938	Regular	Regular
4	48.477	42.433	9.796	9.069	9.432	9.796	0.963	Regular	Regular
3	38.681	33.364	17.198	7.808	12.503	17.198	0.727	Regular	Regular
2	21.483	25.556	11.892	13.827	12.860	13.827	0.930	Regular	Regular
1	9.591	11.729	9.591	11.729	10.660	11.729	0.909	Regular	Regular

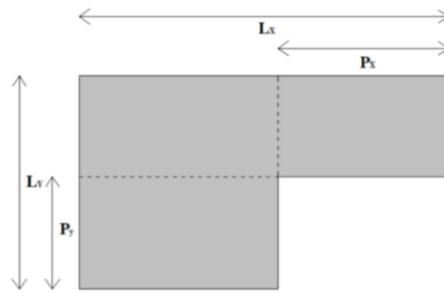
Tabel 4.15 Pengecekan Ketidakberaturan Torsi (Arah Y)

Arah Y									
Lantai	Displacement (mm)		Simpangan Antar Tingkat (mm)		Δ_{Avg} (mm)	Δ_{Max} (mm)	$\Delta_{avg}/\Delta_{max}$	Cek Tipe 1a	Cek Tipe 1b
	δA	δB	ΔA	ΔB					
5	52.847	48.051	6.483	6.392	6.438	6.483	0.993	Regular	Regular
4	46.365	41.659	10.549	8.995	9.772	10.549	0.926	Regular	Regular
3	35.815	32.664	12.807	11.451	12.129	12.807	0.947	Regular	Regular
2	23.008	21.212	12.570	11.396	11.983	12.570	0.953	Regular	Regular
1	10.438	9.816	10.438	9.816	10.127	10.438	0.970	Regular	Regular

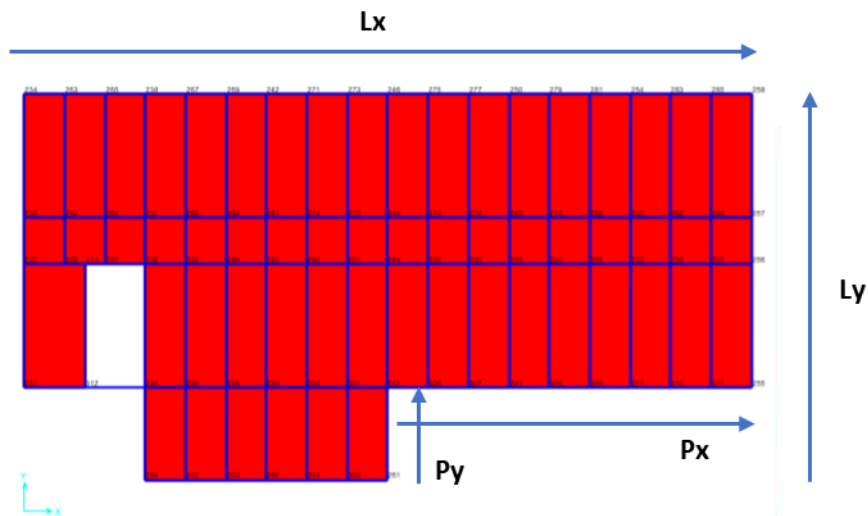
Berdasarkan hasil pengecekan ketidakberaturan torsi pada arah X dan Y, diperoleh bahwa seluruh lantai memenuhi kriteria ketidakberaturan torsi Tipe 1a dan Tipe 1b, sehingga struktur diklasifikasikan sebagai regular terhadap torsi pada arah X dan Y. Dengan demikian, bangunan tidak mengalami ketidakberaturan torsi dan memenuhi ketentuan SNI 1726:2019.

4.1.7.2 Ketidakberaturan Sudut Dalam

Tabel 13 pada SNI 1726:2019 menyatakan bahwa terdapat ketidakberaturan sudut dalam apabila dimensi proyek gambar struktur dari sudut dalam lebih besar dari 15% dari kedua arah dimensi yang ditinjau



Gambar 4.16 Ketidakberaturan Horizontal : Sudut Dalam



Gambar 4.17 Ketidakberaturan Sudut Dalam

Tabel 4.16 Pengecekan Ketidakberaturan Sudut Dalam Sumbu X dan Y

Sumbu X Bangunan		
Lx	48	m
Px	24	m
Px/Lx	50%	Irregular

Sumbu Y Bangunan		
Ly	27	m
Py	6	m
Py/Ly	22%	Irregular

Berdasarkan hasil pengecekan ketidakberaturan sudut dalam pada sumbu X dan Y, diperoleh rasio sebesar 50% pada arah X dan 22% pada arah Y. Nilai rasio tersebut melebihi batas ketentuan ketidakberaturan sudut dalam (15%), sehingga bangunan diklasifikasikan sebagai tidak beraturan

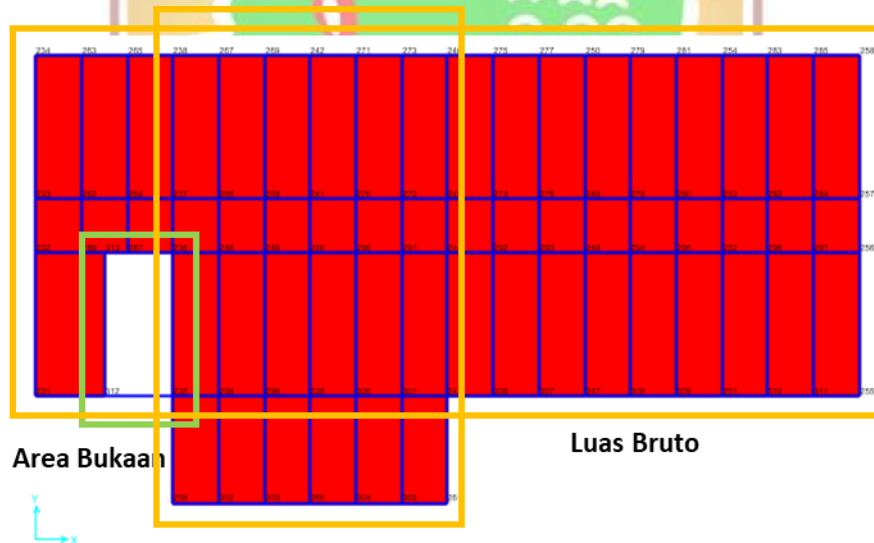
secara horizontal pada kedua arah. Dengan demikian, struktur termasuk dalam kategori ketidakberaturan horizontal sudut dalam.

4.1.7.3 Ketidakberaturan Diskontinuitas Diafragma

Ketidakberaturan ini dinyatakan oleh SNI 1726:2019 apabila terjadi luas bukaan diafragma yang melebihi 50% dari total luas diafragma pada suatu lantai.



Gambar 4.18 Ketidakberaturan Horizontal : Diskontinuitas Diafragma



Gambar 4.19 Ketidakberaturan Diskontinuitas Diafragma

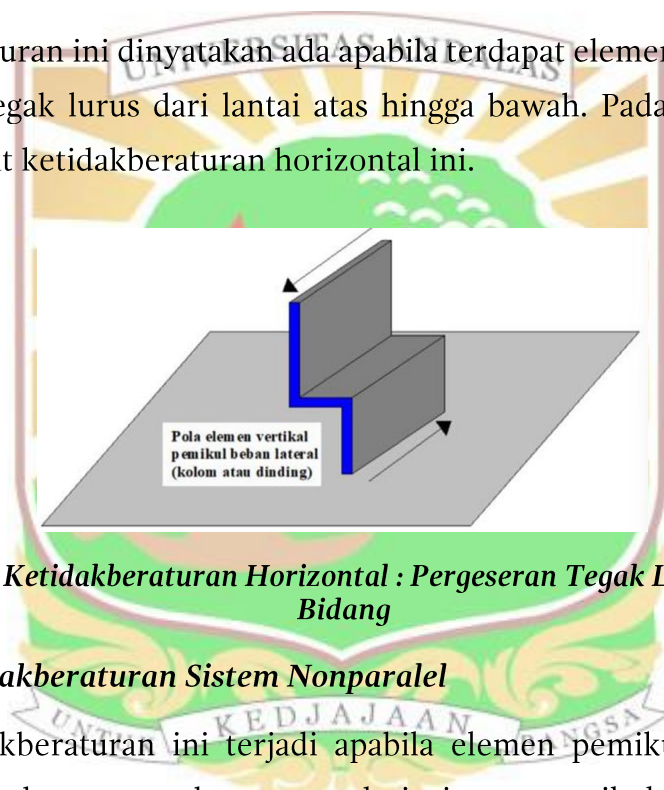
Tabel 4.17 Pengecekan Ketidakberaturan Diskontinuitas Diafragma

Syarat Rasio Bukaan < 50%		
Atotal	1008	m ²
Abukaan	32	m ²
Persentase	3%	Regular

Berdasarkan hasil pengecekan ketidakberaturan diskontinuitas diafragma, diperoleh persentase luas bukaan sebesar 3% terhadap luas total lantai. Nilai tersebut lebih kecil dari batas maksimum 50% yang disyaratkan, sehingga struktur tidak mengalami ketidakberaturan diskontinuitas diafragma dan diklasifikasikan sebagai regular. Dengan demikian, diafragma lantai masih berfungsi secara efektif dalam mendistribusikan gaya gempa sesuai ketentuan SNI 1726:2019

4.1.7.4 Ketidakberaturan Akibat Pergeseran Tegak Lurus Terhadap Bidang

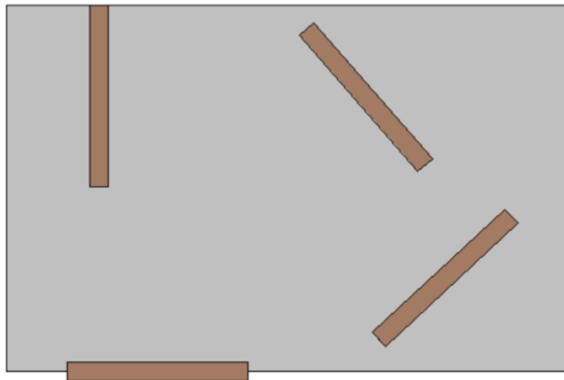
Ketidakberaturan ini dinyatakan ada apabila terdapat elemen pemikul gaya yang tidak tegak lurus dari lantai atas hingga bawah. Pada penelitian ini tidak terdapat ketidakberaturan horizontal ini.



Gambar 4.20 Ketidakberaturan Horizontal : Pergeseran Tegak Lurus Terhadap Bidang

4.1.7.5 Ketidakberaturan Sistem Nonparalel

Ketidakberaturan ini terjadi apabila elemen pemikul gaya lateral tidak sejajar dengan sumbu utama dari sistem pemikul seismik. Pada penelitian ini tidak terdapat ketidakberaturan ini pada model yang direncanakan.



Gambar 4.21 Ketidakberaturan Horizontal : Sistem Non Paralel

Berikut rekap hasil pengecekan ketidakberaturan vertikal bisa dilihat pada tabel dibawah.

Tabel 4.18 Rekap Hasil Pengecekan Ketidakberaturan Horizontal

PENGECEKAN KETIDAKBERATURAN HORIZONTAL			
No	Tipe dan Penjelasan Ketidakberaturan	Pasal SNI	Ada/Tidak
1a.	Ketidakberaturan torsi didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimum, yang dihitung termasuk torsi tak terduga dengan $A_x = 1,0$, di salah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu adalah lebih dari 1,2 kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur di mana diafragmanya kaku atau setengah kaku.	7.3.3.4 7.7.3 7.8.4.3 7.1.2.1 Tabel 16 11.3.4	Tidak
1b.	Ketidakberaturan torsi berlebihan didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimum yang dihitung termasuk akibat torsi tak terduga dengan $A_x = 1,0$, di salah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu adalah lebih dari 1,4 kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi berlebihan dalam pasal pasal referensi berlaku hanya untuk struktur di mana diafragmanya kaku atau setengah kaku.	7.3.3.1 7.3.3.4 7.3.4.2 7.7.3 7.8.4.3 7.1.2.1 Tabel 16 11.3.4	Tidak
2.	Ketidakberaturan sudut dalam didefinisikan ada jika kedua dimensi proyeksi denah struktur dari lokasi sudut dalam lebih besar dari 15% dimensi denah struktur dalam arah yang ditinjau.	7.3.3.4 Tabel 16	Ada

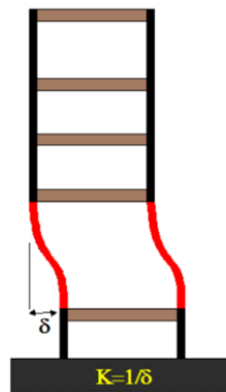
3.	Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma didefinisikan ada jika terdapat suatu diafragma yang memiliki diskontinuitas atau variasi kekakuan mendadak, termasuk yang mempunyai daerah terpotong atau terbuka lebih besar dari 50 % daerah diafragma bruto yang tertutup, atau perubahan kekakuan diafragma efektif lebih dari 50% dari suatu tingkat ke tingkat selanjutnya.	7.3.3.4 Tabel 16	Tidak
4.	Ketidakberaturan akibat pergeseran tegak lurus terhadap bidang didefinisikan ada jika terdapat diskontinuitas dalam lintasan tahanan gaya lateral, seperti pergeseran tegak lurus terhadap bidang pada setidaknya satu elemen vertikal pemikul gaya lateral.	7.3.3.3 7.3.3.4 7.7.3 Tabel 16	Tidak
5.	Ketidakberaturan sistem nonparalel didefinisikan ada jika elemen vertikal pemikul gaya lateral tidak paralel terhadap sumbu utama sistem pemikul gaya seismik.	7.5.3 7.7.3 Tabel 16 11.3.4	Tidak

4.1.8 Pemeriksaan Ketidakberaturan Vertikal Bangunan Eksisting

Pengecekan ketidakberaturan horizontal dan vertikal berdasarkan (SNI 1726:2019, 2019) pada Pasal 7.3.2. Terdapat beberapa pemeriksaan ketidakberaturan vertikal yang harus diperhatikan dalam perencanaan bangunan, antara lain:

4.1.8.1 Ketidakberaturan Tingkat Lunak dan Lunak Berlebihan

Apabila kekakuan sebuah tingkat lebih kecil dari 70% kekakuan tingkat di atasnya atau kecil dari 80% kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya untuk tipe 1a. Sementara tipe 1b yaitu torsi berlebihan terjadi apabila sebuah lantai kurang dari 60% kekakuan tingkat di atasnya atau kecil dari 70% kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.



Gambar 4.22 Ketidakberaturan Vertikal : Kekakuan Tingkat Lunak

Hasil pemeriksaan ketidakberaturan ini dapat dilihat pada tabel dibawah. Hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa tidak terdapat ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak ini.

Tabel 4.19 Pengecekan Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak Arak X

Arah X								
Joint	Elevasi (mm)	Fx (kN)	Vx (kN)	U1 (mm)	Δi (mm)	K (kN/mm)	Cek Tipe 1a	Cek Tipe 1b
410	23000	1	1	0.018567	0.018567	53.859		
327	18550	1	2	0.016408	0.003001	666.445	Regular	Regular
244	14100	1	3	0.013407	0.004124	727.449	Regular	Regular
148	9650	1	4	0.009283	0.004683	854.153	Regular	Regular
54	5250	1	5	0.004600	0.004600	1086.957	Regular	Regular
229	0	0		0	0			

Tabel 4.20 Pengecekan Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak Arak Y

Arah Y								
Joint	Elevasi (mm)	Fy (kN)	Vy (kN)	U2 (mm)	Δi (mm)	K (kN/mm)	Cek Tipe 1a	Cek Tipe 1b
410	23000	1	1	0.016674	0.002030	492.611		
327	18550	1	2	0.014644	0.002768	722.543	Regular	Regular
244	14100	1	3	0.011876	0.003656	820.569	Regular	Regular
148	9650	1	4	0.008220	0.004042	989.609	Regular	Regular
54	5250	1	5	0.004178	0.004178	1196.745	Regular	Regular
229	0	0		0	0			

Berdasarkan hasil pengecekan ketidakberaturan tingkat lunak pada arah X dan arah Y, nilai kekakuan lateral (K) pada setiap tingkat menunjukkan kecenderungan meningkat ke arah bawah bangunan dan tidak ditemukan penurunan kekakuan. Hasil evaluasi pada seluruh tingkat menunjukkan klasifikasi regular untuk ketentuan ketidakberaturan

kekakuan tingkat lunak (Tipe 1a dan Tipe 1b). Dengan demikian, struktur tidak mengalami ketidakberaturan tingkat lunak pada arah X dan memenuhi ketentuan SNI 1726:2019.

4.1.8.2 Ketidakberaturan Berat (Massa)

Ketidakberaturan ini terdapat apabila massa suatu lantai lebih dari 150% dari massa lantai dekatnya.



Gambar 4.23 Ketidakberaturan Vertikal : Kekakuan Berat (Massa)

Berikut hasil pemeriksaan ketidakberaturan ini pada tabel berikut. Dari tabel terlihat terdapat ketidakberaturan massa pada model.

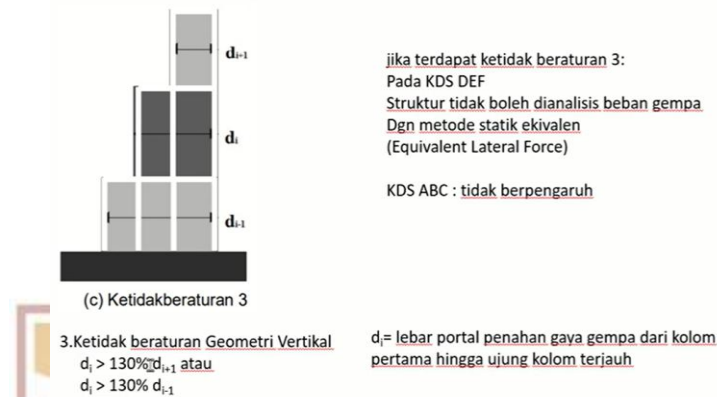
Tabel 4.21 Pengecekan Ketidakberaturan Berat (Massa)

Lantai	Berat (kN)	Cek
5	4555.856	Regular
4	6867.323	Irregular
3	6867.323	Regular
2	7818.489	Regular
1	8763.38	Regular

Hasil pengecekan menunjukkan bahwa struktur mengalami ketidakberaturan vertikal massa, karena terdapat satu tingkat bangunan yang tidak memenuhi persyaratan ketentuan ketidakberaturan massa menurut SNI 1726:2019.

4.1.8.3 Ketidakberaturan Geometri Vertikal

Menurut SNI 1726:2019 pada tabel 14, ketidakberaturan ini ada apabila dimensi horizontal dari elemen pemikul gaya gempa lebih dari 130% dimensi dari tingkat didekatnya.



Gambar 4.24 Ketidakberaturan Vertikal : Geometri Vertikal

Hasil pemeriksaan dapat dilihat pada tabel dibawah ini. Dari tabel terlihat bahwa tidak ada ketidakberaturan ini pada model bangunan.

Tabel 4.22 Pengecekan Ketidakberaturan Geometri Vertikal Arah X

Arah X		
Lantai	Lebar Portal (m)	Cek Tipe 3
5	24	Regular
4	48	Irregular
3	48	Regular
2	48	Regular
1	48	Regular

Tabel 4.23 Pengecekan Ketidakberaturan Geometri Vertikal Arah Y

Arah Y		
Lantai	Lebar Portal (m)	Cek Tipe 3
5	27	Regular
4	27	Regular
3	27	Regular
2	27	Regular
1	27	Regular

Berdasarkan hasil pengecekan ketidakberaturan geometri vertikal sesuai SNI 1726:2019, struktur bangunan pada arah X menunjukkan adanya

ketidakberaturan geometri vertikal (Tipe 3) pada lantai 4 akibat perbedaan lebar portal yang signifikan dibandingkan lantai di atasnya. Sementara itu, lantai lainnya pada arah X tergolong struktur regular.

Pada arah Y, hasil pengecekan menunjukkan bahwa seluruh lantai memiliki lebar portal yang seragam sehingga tidak ditemukan ketidakberaturan geometri vertikal (Tipe 3). Dengan demikian, struktur bangunan pada arah Y dapat dikategorikan sebagai struktur regular terhadap ketidakberaturan geometri vertikal.

4.1.8.4 Ketidakberaturan Akibat Diskontinuitas Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral

Ketidakberaturan ini ada apabila terdapat pergeseran arah elemen pemikul gaya lateral yang lebih besar dari panjang elemen tersebut atau terdapat reduksi kekakuan pada elemen di tingkat dibawahnya.



Gambar 4.25 Ketidakberaturan Vertikal : Ketidakberaturan Arah Akibat Diskontinuitas Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral



Gambar 4.26 Ketidakberaturan Arah Akibat Diskontinuitas Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral

Tabel 4.24 Ketidakberaturan Arah Akibat Diskontinuitas Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral Arah X

Arah X			
Lantai	Panjang Elemen	Offset	Cek Tipe 3
	(m)	(m)	
5	24	16	Regular
4	48	0	Regular
3	48	0	Regular
2	48	0	Regular
1	48	0	Regular

Tabel 4.25 Ketidakberaturan Arah Akibat Diskontinuitas Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral Arah Y

Arah Y			
Lantai	Panjang Elemen	Offset	Cek Tipe 3
	(m)	(m)	
5	19	8	Regular
4	19	8	Regular
3	27	0	Regular
2	27	0	Regular
1	27	0	Regular

Berdasarkan hasil pengecekan ketidakberaturan akibat diskontinuitas elemen vertikal pemikul gaya lateral sesuai SNI 1726:2019, struktur bangunan pada arah X menunjukkan bahwa seluruh lantai berada dalam kondisi regular, meskipun terdapat offset pada lantai 5. Nilai offset tersebut masih berada dalam batas yang diperkenankan sehingga tidak menyebabkan terjadinya ketidakberaturan struktural.

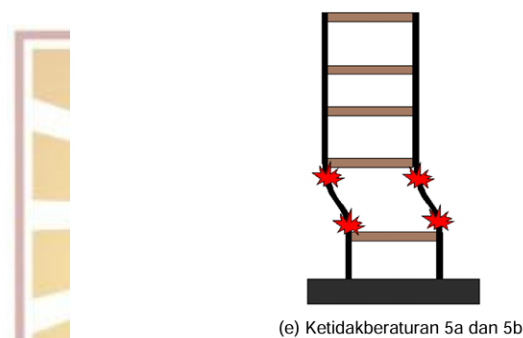
Pada arah Y, hasil pengecekan juga menunjukkan bahwa seluruh lantai tergolong struktur regular, walaupun terdapat offset pada lantai 4 dan lantai 5. Diskontinuitas elemen vertikal yang terjadi tidak melampaui batas ketentuan SNI 1726:2019 sehingga tidak dikategorikan sebagai ketidakberaturan.

Dengan demikian, struktur bangunan baik pada arah X maupun arah Y tidak mengalami ketidakberaturan akibat diskontinuitas elemen vertikal

pemikul gaya lateral dan memenuhi ketentuan perencanaan gempa berdasarkan SNI 1726:2019.

4.1.8.5 Ketidakberaturan Tingkat Lemah dan Lemah Berlebihan Akibat Diskontinuitas Pada Kekuatan Laterral Tingkat

Ketidakberaturan tingkat lemah berlaku apabila terdapat kekakuan dari suatu tingkat kurang dari 80% atau 60% dari kekakuan lateral dari tingkat di atasnya. Hasil pemeriksaan ketidakberaturan ini dapat dilihat pada tabel dibawah.



Gambar 4.27 Ketidakberaturan Vertikal : Ketidakberaturan Tingkat Lemah dan Lemah Berlebih

Tabel 4.26 Ketidakberaturan Tingkat Lemah dan Tingkat Lemah Berlebih (Arah X)

Arah X									
Lantai	Berat (kN)	h (m)	k	W.h ^k	Cv	Vx	Vi/Vi+1	Cek Tipe 5a	Cek Tipe 5b
5	5488.209	23	1.241	268635.86	0.24419	0.24419			
4	8945.265	18.55	1.241	335311.80	0.30480	0.54900	2.248	Regular	Regular
3	9896.431	14.1	1.241	263946.13	0.23993	0.78893	1.437	Regular	Regular
2	11137.311	9.65	1.241	185547.53	0.16867	0.95759	1.214	Regular	Regular
1	5959.682	5.25	1.241	46650	0	1.00000	1.044	Regular	Regular
Total	41426.898			1100091.18	1				

Tabel 4.27 Ketidakberaturan Tingkat Lemah dan Tingkat Lemah Berlebih (Arah Y)

Arah Y									
Lantai	Berat (kN)	h (m)	k	W.h ^k	Cv	Vy	Vi/Vi+1	Cek Tipe 5a	Cek Tipe 5b
5	5488.209	23	1.241	268635.86	0.24419	0.24419			
4	8945.265	18.55	1.241	335311.80	0.30480	0.54900	2.248	Regular	Regular
3	9896.431	14.1	1.241	263946.13	0.23993	0.78893	1.437	Regular	Regular
2	11137.311	9.65	1.241	185547.53	0.16867	0.95759	1.214	Regular	Regular
1	5959.682	5.25	1.241	46650	0	1.00000	1.044	Regular	Regular
Total	41426.898			1100091.18	1				

Berdasarkan hasil pengecekan ketidakberaturan tingkat lemah (Tipe 5a) dan tingkat lemah berlebih (Tipe 5b) sesuai ketentuan SNI 1726:2019, struktur bangunan pada arah X dan arah Y menunjukkan bahwa rasio gaya geser antar lantai (V_i/V_{i+1}) pada seluruh tingkat masih berada dalam batas yang diperkenankan. Oleh karena itu, struktur pada arah X tidak mengalami ketidakberaturan tingkat lemah maupun tingkat lemah berlebih dan dikategorikan sebagai struktur regular.

Berikut rekap hasil pengecekan ketidakberaturan vertikal bisa dilihat pada tabel dibawah.

Tabel 4.28 Rekap Hasil Pengecekan Ketidakberaturan Vertikal

PENGECEKAN KETIDAKBERATURAN VERTIKAL			
No	Tipe dan Penjelasan Ketidakberaturan	Pasal SNI	Ada/Tidak
1a.	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak didefinisikan jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 70 % kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80 % kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	Tabel 16	Tidak
1b.	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak Berlebih didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 60 % kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 70 % kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	7.3.3.1 Tabel 16	Tidak
2.	Ketidakberaturan Berat (Massa) didefinisikan ada jika massa efektif di sebarang tingkat lebih dari 150 % massa efektif tingkat di dekatnya. Atap yang lebih ringan dari lantai di bawahnya tidak perlu ditinjau.	Tabel 16	Ada

3.	Ketidakberaturan Geometri Vertikal didefinisikan ada jika dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik di sebarang tingkat lebih dari 130 % dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik tingkat didekatnya.	Tabel 16	Ada
4.	Ketidakberaturan Akibat Diskontinuitas Bidang pada Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral didefinisikan ada jika pergeseran arah bidang elemen pemikul gaya lateral lebih besar dari panjang elemen itu atau terdapat reduksi kekakuan elemen pemikul di tingkat di bawahnya.	7.3.3.3 7.3.3.4 Tabel 16	Tidak
5a.	Ketidakberaturan Tingkat Lemah Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat didefinisikan ada jika kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 80 % kekuatan lateral tingkat di atasnya. Kekuatan lateral tingkat adalah kekuatan total semua elemen pemikul seismik yang berbagi geser tingkat pada arah yang ditinjau.	7.3.3.1 Tabel 16	Tidak
5b.	Ketidakberaturan Tingkat Lemah Berlebihan Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat didefinisikan ada jika kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 65 % kekuatan lateral tingkat di atasnya. Kekuatan lateral tingkat adalah kekuatan total semua elemen pemikul seismik yang berbagi geser tingkat pada arah yang ditinjau.	7.3.3.1 7.3.3.2 Tabel 16	Tidak

Berdasarkan hasil evaluasi Ketidakberaturan, distribusi massa, dan kekakuan struktur bangunan mengacu pada ketentuan SNI 1726, diperoleh hasil pemeriksaan ketidakberaturan struktur sebagaimana disajikan pada Tabel berikut.

Tabel 4.29 Berdasarkan hasil evaluasi Ketidakberaturan

No	Jenis Ketidakberaturan	Kriteria SNI	Kondisi Bagnunan	Hasil
1	Vertikal Tipe 2 (Ketidakberaturan Massa)	Perbedaan massa lantai signifikan terhadap lantai di bawahnya	Massa lantai paling atas jauh lebih kecil dibandingkan lantai di bawahnya	Terjadi
2	Vertikal Tipe 3 (Ketidakberaturan Kekakuan)	Penurunan kekakuan	Lebar portal dan luas lantai paling	Terjadi

		lantai secara signifikan	atas lebih kecil dari lantai di bawahnya	
3	Horizontal Tipe 2 (Sudut Dalam / Re-entrant Corner)	Dimensi proyeksi sudut dalam > 15% dimensi total bangunan	Dimensi proyeksi sudut dalam melebihi 15% dimensi bangunan	terjadi

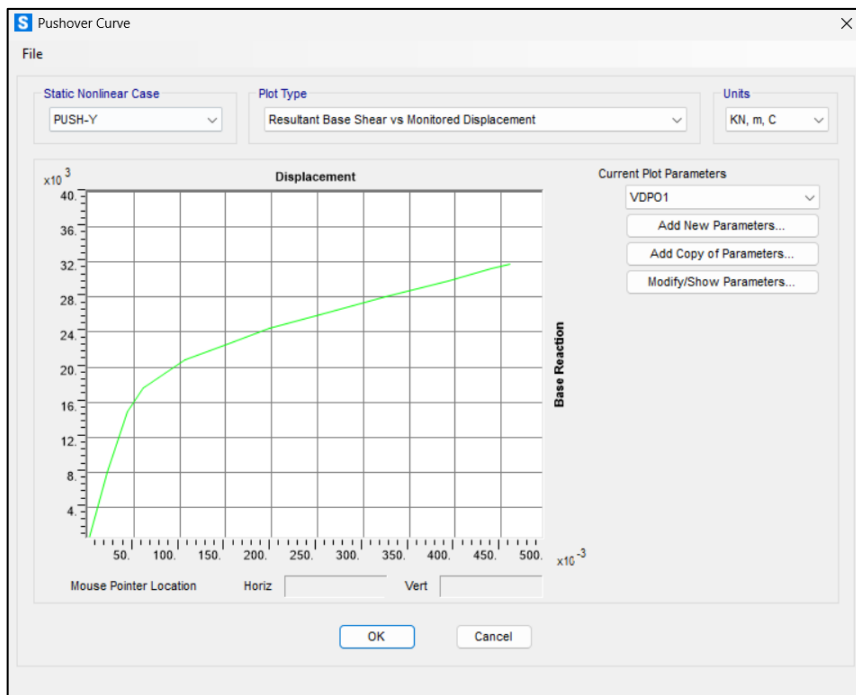
4.1.9 Analisis Statik Nonlinear *Pushover Analysis* (Bangunan Eksisting)

4.1.9.1 Menampilkan Kurva Pushover (Bangunan Eksisting)

Tampilan kurva pushover arah X dan Arah Y adalah sebagai berikut.



Gambar 4.28 Kurva Pushover - X (Bangunan Eksisting)



Gambar 4.29 Kurva Pushover - Y (Bangunan Eksisting)

Selanjutnya tampilkan plot kurva untuk memunculkan plot-plot gaya beserta perpindahannya untuk setiap beban dorong yang diberikan pada bangunan.

LoadCase Text	Step	Displacement	BaseForce KN	Atot	Btot	ICtot	LSot	CPot	CDot	EDot	BeyondE	Total Uniflex
PUSH-X	0	0.000157	0	2580	0	0	0	0	0	0	0	2580
PUSH-X	1	0.03611	12222.711	2578	2	0	0	0	0	0	0	2580
PUSH-X	2	0.056175	17233.078	2348	232	0	0	0	0	0	0	2580
PUSH-X	3	0.076118	19618.125	2200	380	0	0	0	0	0	0	2580
PUSH-X	4	0.124997	22330.439	2064	512	0	0	4	0	0	0	2580
PUSH-X	5	0.170897	24228.391	2038	536	0	0	6	0	0	0	2580
PUSH-X	6	0.228272	26558.174	1992	582	0	0	6	0	0	0	2580
PUSH-X	7	0.279909	28439.845	1920	608	46	0	6	0	0	0	2580
PUSH-X	8	0.334416	30201.645	1856	648	68	0	8	0	0	0	2580
PUSH-X	9	0.380316	31606.211	1824	610	132	0	14	0	0	0	2580
PUSH-X	10	0.426216	32881.838	1808	526	226	0	20	0	0	0	2580
PUSH-X	11	0.459157	33868.351	1802	460	290	0	28	0	0	0	2580

Gambar 4.30 Output Tabel Push X Bangunan Eksisting

Pushover Capacity Curve

File View Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted

Filter:

LoadCase Text	Step Unitless	Displacement	BaseForce KN	AtoB Unitless	BtoIO Unitless	IOtoLS Unitless	LStoCP Unitless	CPtoC Unitless	CtoD Unitless	DtoE Unitless	BeyondE Unitless	Total Unitless
PUSH-Y	0	0.000406	0	2580	0	0	0	0	0	0	0	2580
PUSH-Y	1	0.020965	7951.701	2576	4	0	0	0	0	0	0	2580
PUSH-Y	2	0.042494	14886.405	2418	162	0	0	0	0	0	0	2580
PUSH-Y	3	0.059624	17649.216	2264	316	0	0	0	0	0	0	2580
PUSH-Y	4	0.105524	20835.682	2104	476	0	0	0	0	0	0	2580
PUSH-Y	5	0.151424	22664.089	2048	530	0	0	2	0	0	0	2580
PUSH-Y	6	0.197324	24385.012	1990	588	0	0	2	0	0	0	2580
PUSH-Y	7	0.260436	26272.918	1932	616	30	0	2	0	0	0	2580
PUSH-Y	8	0.323549	28046.719	1878	616	84	0	2	0	0	0	2580
PUSH-Y	9	0.392399	29826.984	1850	526	202	0	2	0	0	0	2580
PUSH-Y	10	0.438299	31192.361	1826	446	306	0	2	0	0	0	2580
PUSH-Y	11	0.459406	31772.373	1822	416	340	0	2	0	0	0	2580

Record: << < 2 > >> of 12

Done

Gambar 4.31 Output Tabel Push Y Bangunan Eksisting

Dari hasil *running pushover analysis*, untuk arah x-x didapatkan 10 step pola beban dorong sedangkan arah y-y didapatkan 12 pola beban dorong yang diberikan struktur hingga struktur mengalami keruntuhan.

4.1.9.2 Mekanisme Terjadinya Sendi Plastis (Bangunan Eksisting)

a. Sendi Plastis Arah x-x

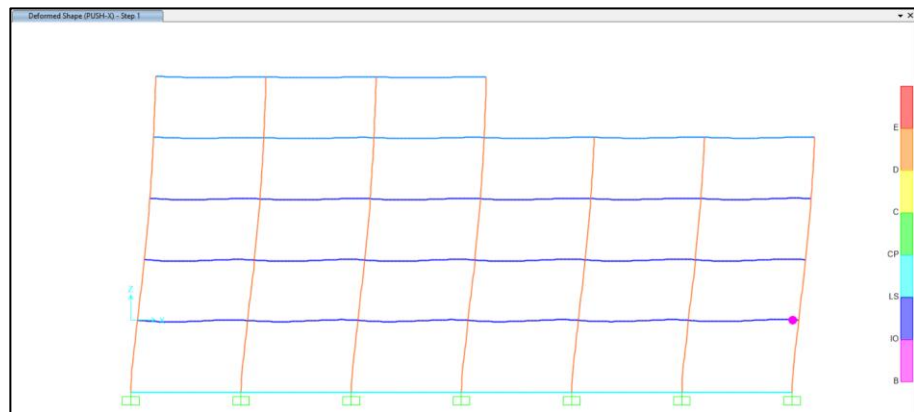
Pembebanan arah x-x (Push-X) struktur berhenti pada step ke-11 dengan *displacement* terbesar 459,16 mm dan gaya geser sebesar 33868,35 kN yang bisa dilihat dari tabel berikut.

Tabel 4.30 Sendi Plastis Arah x-x Bangunan Eksisting

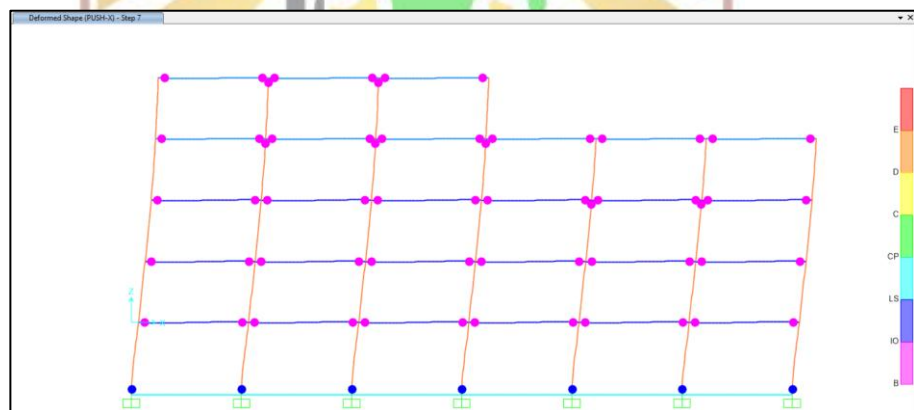
Step	Load Case	Monitored Displacement	Base Force	A - B	B - IO	IO - LS	LS - CP	CP - C	C - D	D - E	> E	Total
		(mm)	(kN)									
0	PUSH-X	0.16	0	2580	0	0	0	0	0	0	0	2580
1	PUSH-X	36.11	12222.71	2578	2	0	0	0	0	0	0	2580
2	PUSH-X	56.17	17233.08	2348	232	0	0	0	0	0	0	2580
3	PUSH-X	76.12	19818.13	2200	380	0	0	0	0	0	0	2580
4	PUSH-X	125.00	22330.44	2064	512	0	0	4	0	0	0	2580
5	PUSH-X	170.90	24228.39	2038	536	0	0	6	0	0	0	2580
6	PUSH-X	228.27	26558.17	1992	582	0	0	6	0	0	0	2580
7	PUSH-X	279.91	28439.85	1920	608	46	0	6	0	0	0	2580
8	PUSH-X	334.42	30201.65	1856	648	68	0	8	0	0	0	2580
9	PUSH-X	380.32	31606.21	1824	610	132	0	14	0	0	0	2580
10	PUSH-X	426.22	32881.84	1808	526	226	0	20	0	0	0	2580
11	PUSH-X	459.16	33868.35	1802	460	290	0	28	0	0	0	2580

Dari tabel dapat dilihat bahwa setiap step pola beban dorong akan mempunyai tingkatan plastisifikasi yang berbeda pada masing-masing elemen strukturnya. Pada step ke-1 sampai step ke-3 elemen masih berada pada kondisi A-IO. pada step ke-7 mulai

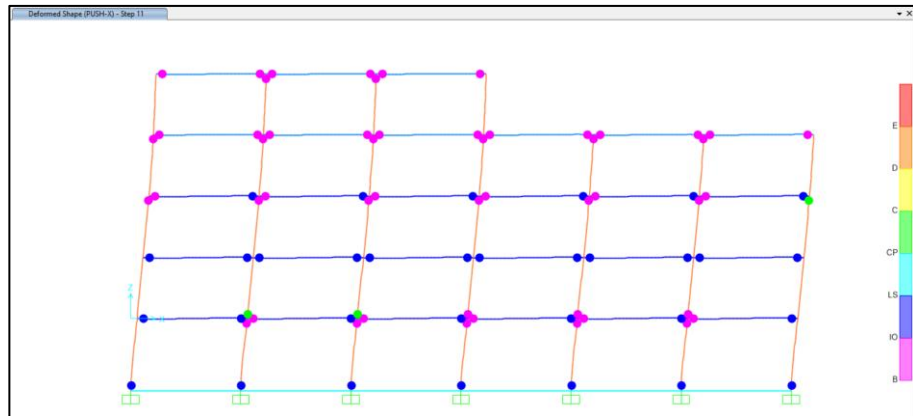
terjadi kondisi IO-LS pada 46 elemen dan meningkat menjadi 290 elemen pada step ke-11. Pada step ke-4 sudah mulai terjadi kondisi >CP pada 4 elemen struktur dan terus meningkat sebanyak 28 elemen pada step ke-11. Hal ini menunjukkan bahwa setiap beban dorong pada pushover arah x-x bangunan eksisting yang mengalami kenaikan, maka kondisi plastifikasi pada elemen juga akan meningkat secara bertahap.



Gambar 4.32 Distribusi sendi plastis hasil pushover arah X pada bangunan retrofitting (step awal pembebanan)



Gambar 4.33 Distribusi sendi plastis hasil pushover arah X pada bangunan retrofitting (step transisi plastifikasi)



Gambar 4.34 Distribusi sendi plastis hasil pushover arah X pada bangunan retrofitting (step akhir pushover)

b. Sendi Plastis Arah y-y

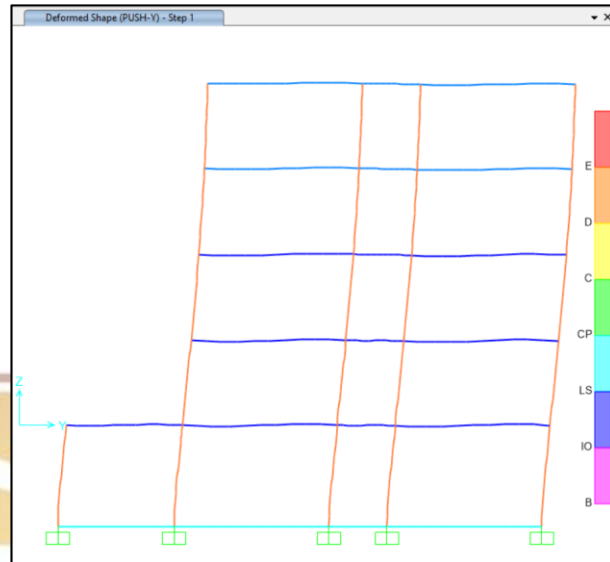
Pembebanan arah x-x (Push-X) struktur berhenti pada step ke-11 dengan *displacement* terbesar 459,41 mm dan gaya geser sebesar 31772,37 kN yang bisa dilihat dari tabel berikut.

Tabel 4.31 Sendi Plastis Arah y-y Bangunan Eksisting

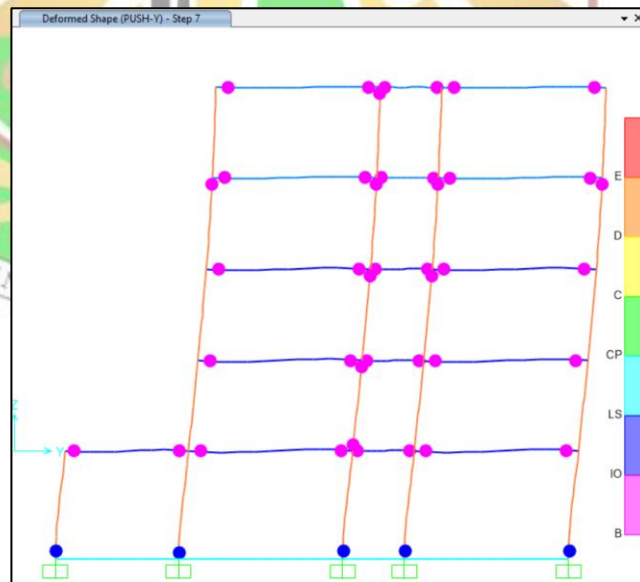
Step	Load Case	Monitored Displacement	Base Force	A - B	B - IO	IO - LS	LS - CP	CP - C	C - D	D - E	> E	Total
		(mm)	(kN)									
0	PUSH-Y	0.41	0	2580	0	0	0	0	0	0	0	2580
1	PUSH-Y	20.97	7951.70	2576	4	0	0	0	0	0	0	2580
2	PUSH-Y	42.49	14886.41	2418	162	0	0	0	0	0	0	2580
3	PUSH-Y	59.62	17649.22	2264	316	0	0	0	0	0	0	2580
4	PUSH-Y	105.52	20835.68	2104	476	0	0	0	0	0	0	2580
5	PUSH-Y	151.42	22664.09	2048	530	0	0	2	0	0	0	2580
6	PUSH-Y	197.32	24385.01	1990	588	0	0	2	0	0	0	2580
7	PUSH-Y	260.44	26272.92	1932	616	30	0	2	0	0	0	2580
8	PUSH-Y	323.55	28046.72	1878	616	84	0	2	0	0	0	2580
9	PUSH-Y	392.40	29826.98	1850	526	202	0	2	0	0	0	2580
10	PUSH-Y	438.30	31192.36	1826	446	306	0	2	0	0	0	2580
11	PUSH-Y	459.41	31772.37	1822	416	340	0	2	0	0	0	2580

Dari tabel dapat dilihat bahwa setiap step pola beban dorong akan mempunyai tingkatan plastisifikasi yang berbeda pada masing-masing elemen strukturnya. Pada step ke-1 sampai step ke-4 elemen masih berada pada kondisi A-IO. pada step ke-7 mulai terjadi kondisi IO-LS pada 30 elemen dan meningkat menjadi 340 elemen pada step ke-11. Pada step ke-5 sudah mulai terjadi kondisi >CP pada 2 elemen struktur dan stabil 2 elemen sampai step ke-11. Hal ini menunjukkan bahwa setiap beban dorong pada pushover

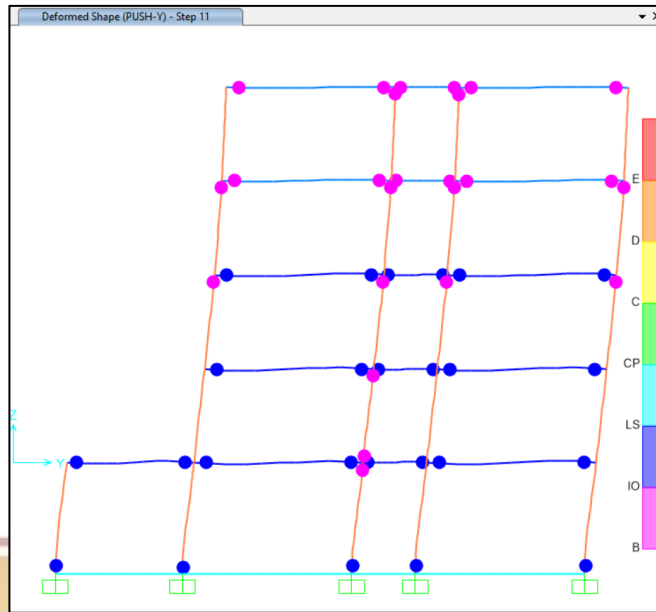
arah y-y bangunan eksisting yang mengalami kenaikan, maka kondisi plastifikasi pada elemen juga akan meningkat secara bertahap.



Gambar 4.35 Distribusi sendi plastis hasil pushover arah Y pada bangunan retrofitting (step awal pembebanan)



Gambar 4.36 Distribusi sendi plastis hasil pushover arah Y pada bangunan retrofitting (step transisi plastifikasi)



Gambar 4.37 Distribusi sendi plastis hasil pushover arah Y pada bangunan retrofitting (step akhir pushover)

4.1.9.3 Level Kinerja Struktur Bangunan Eksisting

a. ATC (Applied Technology Council) 40

Level kinerja struktur ditentukan berdasarkan Tabel 5.5.4 ATC-40. Level kinerja struktur secara keseluruhan dapat ditentukan dengan melihat rasio antara nilai perpindahan atap pada titik performa dengan tinggi keseluruhan gedung. Berdasarkan tingkat kinerja struktur ATC-40 secara keseluruhan dapat ditentukan melalui tabel berikut:

Tabel 4.32 Batasan deformasi pada tingkat kinerja struktur (ATC-40)

Interstory Drift Limit	Performance Level			
	Immediate occupancy	Damage Control	Life Safety	Collapse Prevention
Maximum total drift	0,01	0,01 – 0,02	0,02	$0,33 \frac{V_i}{P_i}$
Maximum inelastic drift	0,005	0,005 – 0,015	No limit	No limit

Sumber : (Applied Technology Council, 1996)

Adapun rasio nilai perpindahan atap saat *performance point* dapat dilakukan dengan cara :

- Klik menu *Display – Show Static Pushover Curve*, pada option *Plot Type* pilih *ATC-40 Capacity Spectrum* dan klik *Modify/Show Parameter* dan input nilai *CA* dan *CV*.
- Berdasarkan SNI 1726:2019 respon gempa untuk wilayah Padang untuk tanah sedang diketahui:
 - Parameter respon percepatan pada periode 0,2 dt,
SMS = 1,1809 g
 - Parameter respon percepatan pada periode 1,0 dt,
SM1 = 0,99 g

Selanjutnya berdasarkan ATC-40 pasal 4.4.3.1 dapat dihitung parameter nilai *CA* dan *CV* sebagai berikut :

$$CA = 0,4 S_{MS}$$

Persamaan 6

$$CA = 0,4 \times 1,1809$$

$$CA = 0,4724 \text{ g}$$

$$CV = S_{M1}$$

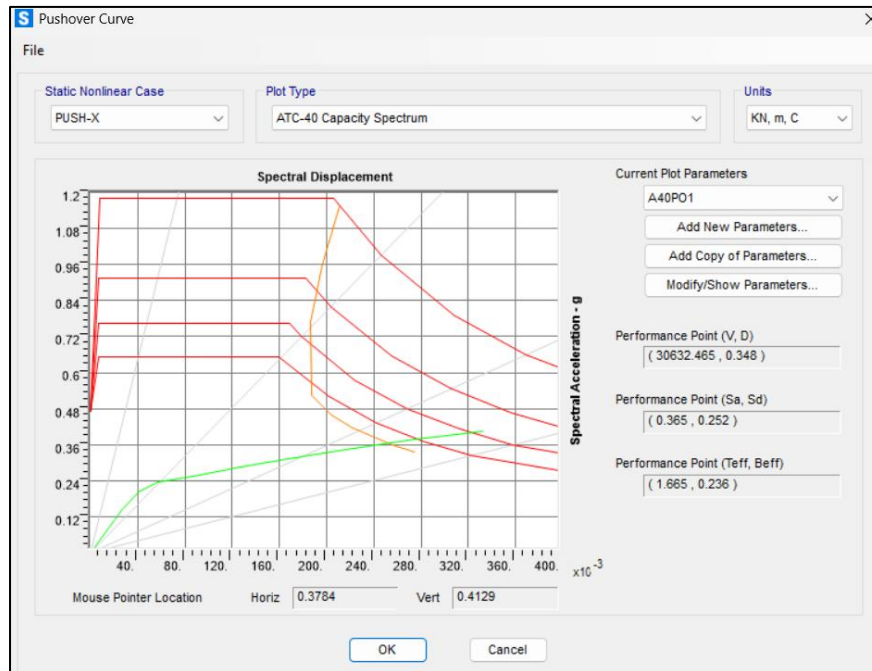
Persamaan 7

$$CV = 0.99 \text{ g}$$

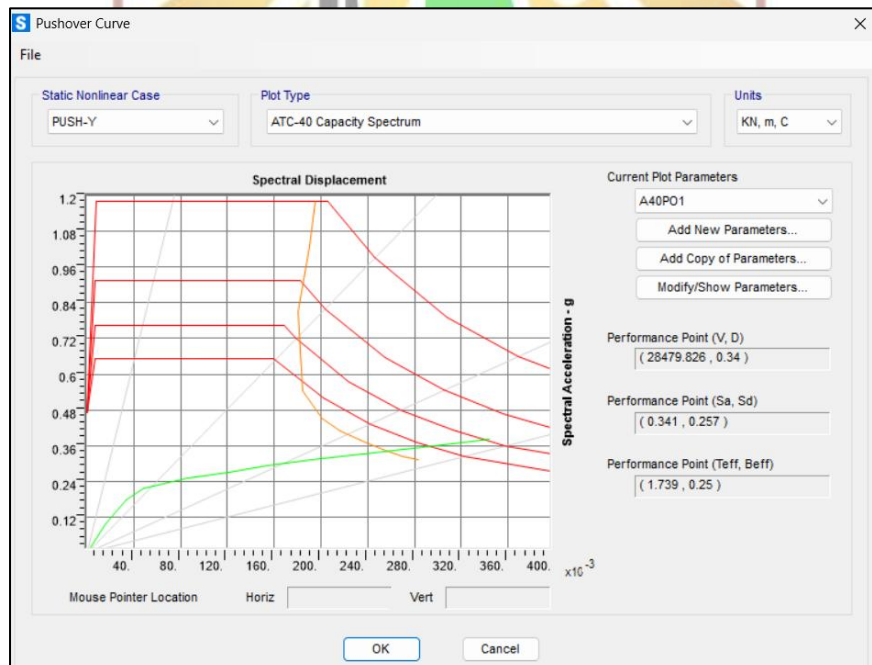


Gambar 4.38 Input nilai *Ca* dan *Cv* pada spektrum kapasitas

Hasil dari spektrum kapasitas dari masing-masing arah baik arah-x maupun arah-y adalah sebagai berikut.



Gambar 4.39 kurva Kapasitas Arah – X (Bangunan Eksisting)



Gambar 4.40 Kurva Kapasitas Arah – Y (Bangunan Eksisting)

Selanjutnya untuk menentukan tingkat kinerja parameter yang diperlukan adalah nilai perpindahan atap saat *performance point* dan nilai perpindahan atap saat beban dorong Step ke-1, dimana tinggi total bangunan = 23 m

Diketahui :

Displacement at roof/performance point (D_t)

- $D_{t-x} = 0,348$

- $D_{t-y} = 0,34$

Tinggi Bangunan = 23 m

(H_{total})

Displacement at roof Step ke-1

- $D_{1-x} = 0,0361$

- $D_{1-y} = 0,0209$

- Simpangan Total Maksimum

$$\text{Arah } x - x = \frac{D_{t-x}}{H_{total}}$$

$$\text{Arah } x - x = \frac{0,348}{23} = 0,0151 \quad (\text{Damage Control})$$

$$\text{Arah } y - y = \frac{D_{t-y}}{H_{total}}$$

$$\text{Arah } y - y = \frac{0,34}{23} = 0,0148 \quad (\text{Damage Control})$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa simpangan total maksimum pada arah x-x sebesar 0,0151, sedangkan pada arah y-y sebesar 0,0148. Nilai tersebut diperoleh dari rasio antara displacement maksimum di atap terhadap tinggi total bangunan. Berdasarkan kriteria kinerja ATC-40, nilai simpangan total maksimum pada kedua arah tersebut berada dalam kategori **Damage Control (DC)**. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur telah mengalami kerusakan struktural ringan hingga sedang, namun masih memiliki

kemampuan menahan gaya gempa tanpa mengalami keruntuhan global.

- Simpangan Inelastis Maksimum

$$\text{Arah } x - x = \frac{D_{t-x} - D_{1-x}}{H_{total}}$$

$$\text{Arah } x - x = \frac{0,348 - 0,0361}{23} = 0,01356 \quad (\text{Damage Control})$$

$$\text{Arah } y - y = \frac{D_{t-y} - D_{1-y}}{H_{total}}$$

$$\text{Arah } y - y = \frac{0,34 - 0,0209}{23} = 0,01387 \quad (\text{Damage Control})$$

Hasil perhitungan simpangan inelastis maksimum, yang diperoleh dari selisih displacement pada *performance point* dengan displacement elastis awal (step ke-1), menghasilkan nilai 0,0361 untuk arah x-x dan 0,0209 untuk arah y-y. Nilai simpangan inelastis maksimum pada kedua arah tersebut juga termasuk dalam level kinerja **Damage Control (DC)** menurut ATC-40. Hal ini mengindikasikan bahwa perilaku inelastis struktur telah terjadi secara signifikan, namun masih berada dalam batas yang dapat diterima tanpa menyebabkan kegagalan struktur yang membahayakan keselamatan jiwa.

Hasil evaluasi kinerja struktur bangunan eksisting menunjukkan bahwa bangunan berada pada level kinerja **Damage Control (DC)** untuk arah x-x maupun arah y-y. Kondisi ini menandakan bahwa bangunan masih mampu menahan beban gempa rencana, namun telah mengalami kerusakan struktural yang memerlukan perhatian lebih lanjut. Oleh karena itu, penerapan tindakan *retrofitting* menjadi penting untuk meningkatkan kekakuan dan kapasitas struktur.

b. FEMA (Federal Emergency Management Agency) 356

Penentuan level kinerja struktur pada penelitian ini mengacu pada FEMA 356, yang menghubungkan tingkat bahaya gempa dengan batas kerusakan bangunan. Berdasarkan FEMA 356, kinerja struktur dinyatakan dalam empat level, yaitu Operational (OP), Immediate Occupancy (IO), Life Safety (LS), dan Collapse Prevention (CP), yang masing-masing memiliki batas simpangan (drift) tertentu. Tabel level kinerja FEMA 356 menunjukkan bahwa target kinerja bangunan ditentukan oleh kombinasi kala ulang gempa dan faktor keutamaan bangunan, di mana bangunan dengan tingkat kepentingan lebih tinggi dituntut mencapai kinerja yang lebih baik pada level gempa yang sama.

Level Desain Gempa		Target Level Kinerja Bangunan Beton			
		Operational	IO	LS	CP
		Level (1-A)	Level (1-B)	Level(3-C)	Level(5-E)
Kala Ulang	72 tahun 50%DBE		x	x	x
	225 tahun 70%DBE			x	x
	474 tahun DBE				x
	2475 tahun MCE				
Drift %		0-0.5%	0.5-1%	1%-2%	2%-4%

Gambar 4.41 Level Kinerja Menurut FEMA 356

Berdasarkan kurva bilinear FEMA 356, dapat diketahui nilai parameter perhitungan level kinerja struktur sebagai berikut :

Tabel 4.33 Parameter Perhitungan Kinerja FEMA 356 (bangunan eksisting)

Calculate Parameter	Arah X	Arah Y
C_0	1,35	1,26
C_1	1	1
C_2	1	1
C_3	1	1
S_a , (g)	0,7457	0,7689
Periode Efektif, T_e (sec)	0,8583	0,8323
g	9,81	

Untuk menghitung target perpindahannya menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\delta_{x,y} = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_a \frac{T e^2}{4\pi^2} g$$

Persamaan 8

$$\delta_x = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_a \frac{T e^2}{4\pi^2} g$$

$$\delta_x = 1,35 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0,7457 \times \frac{0,8583^2}{4\pi^2} \times 9,81$$

$$\delta_x = 0,1842$$

$$\delta_y = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_a \frac{T e^2}{4\pi^2} g$$

$$\delta_y = 1,26 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0,7689 \times \frac{0,8323^2}{4\pi^2} \times 9,81$$

$$\delta_y = 0,1667$$

Kontrol Level Kinerja : perpindahan arah x sebesar 0,1842 m dan arah y sebesar 0,1667 m, menghasilkan simpangan relatif sebesar 0,80% dan 0,72% dari tinggi bangunan. Nilai tersebut berada dalam rentang batas Immediate Occupancy (IO) menurut FEMA 356.

Berdasarkan hasil evaluasi tingkat kinerja struktur mengacu pada FEMA 356, bangunan tanpa dinding geser berada pada level Immediate Occupancy (IO). Meskipun tingkat kinerja tersebut masih berada dalam batas aman, FEMA 356 merekomendasikan agar bangunan dengan fungsi penting memiliki kinerja yang lebih tinggi, yaitu Operational. Mengingat bangunan yang ditinjau difungsikan sebagai gedung pendidikan dengan faktor keutamaan IV, maka diperlukan tingkat kinerja terbaik untuk meminimalkan potensi korban jiwa dan menjamin keberlanjutan fungsi bangunan saat terjadi gempa bumi.

Oleh karena itu, penelitian ini dilanjutkan dengan pemberian perkuatan berupa dinding geser. Pemilihan dinding geser didasarkan pada kemampuannya dalam meningkatkan kekakuan dan kekuatan lateral struktur secara signifikan, sehingga dapat mengurangi simpangan dan meningkatkan kapasitas struktur dalam menahan beban gempa. Dengan adanya perkuatan dinding geser, diharapkan kinerja bangunan dapat

ditingkatkan hingga mencapai level Operational sesuai dengan ketentuan FEMA 356.

4.2 Pengecekan Struktur Bangunan *retrofitting*

Pengecekan struktur bangunan setelah dilakukan *retrofitting* diperlukan untuk memastikan bahwa upaya perkuatan yang diterapkan mampu meningkatkan kapasitas struktur sesuai dengan ketentuan standar dan target kinerja yang direncanakan. Evaluasi ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana elemen-elemen struktur yang telah diperkuat dapat menahan beban gravitasi serta beban lateral akibat gempa dibandingkan kondisi eksisting. Analisis dilakukan melalui pemeriksaan kapasitas elemen yang telah diperkuat, pembentukan sendi plastis baru, serta perubahan pola distribusi gaya lateral akibat peningkatan kekakuan dan daktilitas struktur. Hasil pushover analysis pada kondisi *retrofitting* kemudian dikonversikan ke dalam kurva kapasitas untuk menentukan titik kinerja (*Performance Point*) yang baru. Nilai perpindahan dan *drift* pada titik kinerja tersebut selanjutnya dibandingkan dengan batas-batas kerusakan (*damage state*) untuk memastikan bahwa strategi *retrofitting* yang diterapkan mampu menurunkan tingkat kerentanan dan meningkatkan performa seismik bangunan.

4.2.1 Faktor Skala Gempa

Berdasarkan tabel 4.1 dapat ditentukan nilai koefisien modifikasi respons. Dimana nilai R adalah koefisien modifikasi respons, R = 7. G adalah percepatan gravitasi sebesar 9806,65 mm/s², I_e adalah faktor keutamaan gempa sesuai dengan kategori risiko bangunan pendidikan (IV), maka I_e = 1,5.

$$\begin{aligned}EQ &= G \times I_e / R \\ &= 9806,65 \times 1,5 / 7 \\ EQ &= 2101,43 \text{ mm/s}^2\end{aligned}$$

4.2.2 Periode Fundamental

- a. Tentukan periode fundamental perkiraan

Dari tabel 4.2 didapatkan nilai parameter periode pendekatan C_t dan x sebagai berikut.

$$C_t = 0,0488$$

$$x = 0,75$$

$$h_n = 23 \text{ m}$$

Maka :

$$T_a = 0,0488 \times 0,75^{23}$$

$$T_a = 0,513 \text{ detik}$$

- b. Tentukan nilai koefisien batas atas periode (C_u)

$$SD1 = 0,66025$$

Berdasarkan tabel 4.3, didapatkan nilai C_u adalah 1,4.

- c. Tentukan nilai yang digunakan (T)

$$\text{Jika } T_c > C_u T_a \rightarrow \text{Gunakan } T = C_u T_a$$

$$\text{Jika } T_a < T_c < T_u C_a \rightarrow \text{Gunakan } T = T_c$$

$$\text{Jika } T_c < T_a \rightarrow \text{Gunakan } T = T_a$$

Tabel 4.34 Nilai periode keluaran SAP 2000 Banunan Retrofitting

Step Type	Step Num	Period	UX	UY	RZ
		sec			
Mode	1	0.98685	0.00089	0.73515	0.06404
Mode	2	0.63155	0.58561	0.019	0.13379

Tabel 4.35 Periode Fundamental Arah X – Bangunan Retrofitting

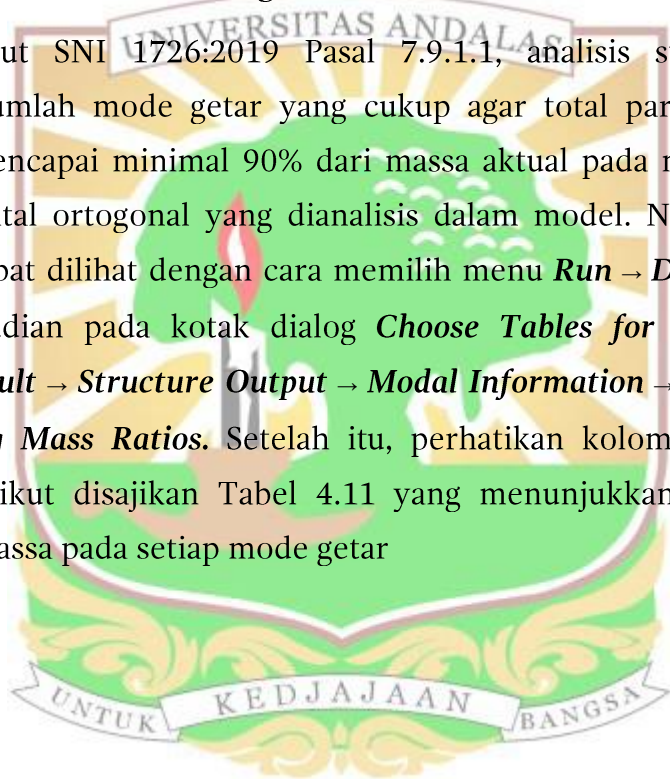
PERIODE/WAKTU GETAR ARAH X		
T_a	$< T_{\text{Program}} <$	
$C_t \times h^x$	$< T_{\text{Program}} <$	$T_a \times C_u$
0,513	0,63155	0,7175
Maka digunakan $T = 0,63155$		

Tabel 4.36 Periode Fundamental Arah Y – Bangunan Retrofitting

PERIODE/WAKTU GETAR ARAH X		
T_a	< T Program <	
$C_t \times h^x$	< T Program <	$T_a \times C_u$
0,513	0,98685	0,7175
Maka digunakan T = 0,7175		

4.2.3 Pemeriksaan Jumlah Ragam

Menurut SNI 1726:2019 Pasal 7.9.1.1, analisis struktur harus mencakup jumlah mode getar yang cukup agar total partisipasi massa gabungan mencapai minimal 90% dari massa aktual pada masing-masing arah horizontal ortogonal yang dianalisis dalam model. Nilai partisipasi massa ini dapat dilihat dengan cara memilih menu **Run** → **Display** → **Show Table**, kemudian pada kotak dialog **Choose Tables for Display**, pilih **Analysis Result** → **Structure Output** → **Modal Information** → **Table: Modal Participating Mass Ratios**. Setelah itu, perhatikan kolom **SumUX** dan **SumUY**. berikut disajikan Tabel 4.11 yang menunjukkan rincian nilai partisipasi massa pada setiap mode getar



Tabel 4.37 Modal Participating Mass Ratios (Bangunan Retrofitting)

Output Case	Step Type	Step Num	Period sec	UX	UY	SUM UX	SUM UY	RZ	SUM RZ
MODAL	Mode	1	0.92486	0.00303	0.59043	0.30%	59.04%	0.18684	6.40%
MODAL	Mode	2	0.59886	0.71155	0.0034	71.46%	59.38%	0.00023	19.78%
MODAL	Mode	3	0.36689	1.9E-06	0.003732	71.46%	59.38%	0.00192	73.13%
MODAL	Mode	4	0.36572	2.6E-05	0.02953	71.46%	59.39%	0.02657	73.13%
MODAL	Mode	5	0.36528	5.8E-07	0.0007638	71.46%	59.39%	0.00162	73.13%
MODAL	Mode	6	0.36047	0.0007	0.2065	71.53%	80.04%	0.49098	73.13%
MODAL	Mode	7	0.35080	0.00126	0.0000188	71.53%	80.04%	1.8E-05	73.13%
MODAL	Mode	8	0.34983	0.00159	0.02146	71.53%	80.04%	0.00037	73.13%
MODAL	Mode	9	0.34952	2.4E-05	2.485E-08	71.53%	80.04%	0.0005	73.13%
MODAL	Mode	10	0.28210	0.0038	0.08297	71.53%	88.34%	0.07963	75.15%
MODAL	Mode	11	0.24064	1.9E-07	0.001934	71.53%	88.34%	0.00108	75.15%
MODAL	Mode	12	0.22967	0.00013	0.01246	71.53%	88.34%	0.00814	75.15%
MODAL	Mode	13	0.19854	2.8E-08	1.78E-09	71.53%	88.34%	2.6E-06	75.15%
MODAL	Mode	14	0.18963	4.9E-05	5.3E-08	71.53%	88.34%	2.7E-05	75.15%
MODAL	Mode	15	0.16920	0.00085	0.00313	71.61%	88.65%	0.00111	78.92%
MODAL	Mode	16	0.16885	0.00788	0.02564	72.40%	91.22%	0.01295	81.84%
MODAL	Mode	17	0.16277	0.08148	0.00248	80.55%	91.46%	0.00053	81.90%
MODAL	Mode	18	0.16163	1.4E-05	0.0000022	80.55%	91.46%	0.00098	92.53%
MODAL	Mode	19	0.16162	0.00013	0.03814	80.56%	91.47%	2.8E-06	92.53%
MODAL	Mode	20	0.16026	0.07998	0.00017	88.56%	91.49%	0.00036	92.53%
MODAL	Mode	21	0.15854	0.01514	0.00006131	88.56%	91.49%	1.7E-05	92.79%
MODAL	Mode	22	0.15854	0.07779	0.005404	88.57%	91.49%	0.00412	92.79%
MODAL	Mode	23	0.15793	0.03872	0.00083	92.44%	91.57%	0.04194	92.79%
MODAL	Mode	24	0.14166	5E-07	8.546E+10	92.44%	91.57%	0.00208	93.26%
MODAL	Mode	25	0.12921	0.00013	0.006898	92.44%	91.57%	0.02184	93.26%
MODAL	Mode	26	0.12304	0.0004	0.02814	92.44%	91.57%	0.00066	93.26%
MODAL	Mode	27	0.12276	0.02109	0.07406	92.45%	91.58%	0.00096	93.26%
MODAL	Mode	28	0.12160	0.00118	7.062E-06	92.45%	91.58%	0.06452	93.26%
MODAL	Mode	29	0.12052	0.00014	0.00003202	92.46%	91.58%	0.04928	93.26%
MODAL	Mode	30	0.12035	7.5E-05	0.00113	92.47%	91.69%	0.00344	93.26%

Modal participating mass ratios pada bangunan setelah dilakukan *retrofitting* dengan penambahan dinding geser menunjukkan perubahan signifikan pada perilaku dinamik struktur. Pada kondisi ini, mode pertama didominasi oleh gerakan arah Y, dengan partisipasi massa sebesar 59.04%, sedangkan arah X hanya berkontribusi sebesar 0.30%. Hal ini mengindikasikan bahwa setelah dilakukan perkuatan, arah Y menjadi arah paling fleksibel dari struktur karena kekakuan pada arah X meningkat secara substansial akibat keberadaan dinding geser. Mode kedua menunjukkan dominasi pada arah X sebesar 71,46%, sedangkan arah Y hanya berkontribusi 59,38%.

Akumulasi partisipasi massa terus meningkat pada mode-mode berikutnya dengan kontribusi kecil pada masing-masing mode. Pada akhirnya, partisipasi massa total mencapai 92.47% untuk arah X dan 91.69% untuk arah Y pada mode ke-30. Nilai kumulatif ini telah memenuhi

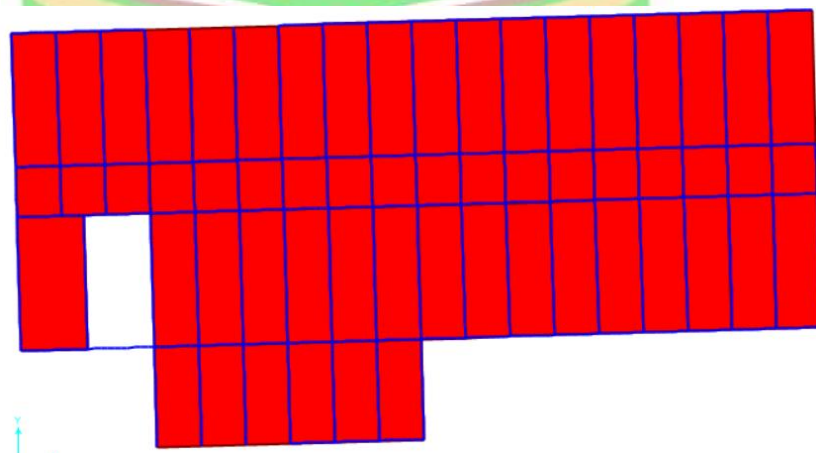
persyaratan minimum partisipasi massa untuk analisis respons spektrum, yakni $\geq 90\%$ pada masing-masing arah.

Perubahan urutan mode dominan antara kondisi eksisting dan *retrofitting* menunjukkan bahwa dinding geser memberikan peningkatan kekakuan lateral terutama pada arah X, sehingga menggeser mode dominan arah X dari mode pertama (pada kondisi eksisting) menjadi mode kedua. Dengan demikian, arah Y kini menjadi arah paling fleksibel dan muncul sebagai mode pertama pada kondisi setelah *retrofitting*. Hal ini membuktikan bahwa strategi perkuatan yang diterapkan berhasil meningkatkan kekakuan struktur pada arah X sehingga mendistribusikan ulang respons dinamik struktur.

Secara keseluruhan, hasil analisis modal pada kondisi *retrofitting* menunjukkan bahwa struktur telah memiliki karakteristik dinamik yang lebih kaku dan lebih stabil dibanding kondisi eksisting, serta memenuhi persyaratan partisipasi massa untuk analisis lanjutan seperti respons spektrum dan pushover analysis.

a. Mode Shape 1 Translasi

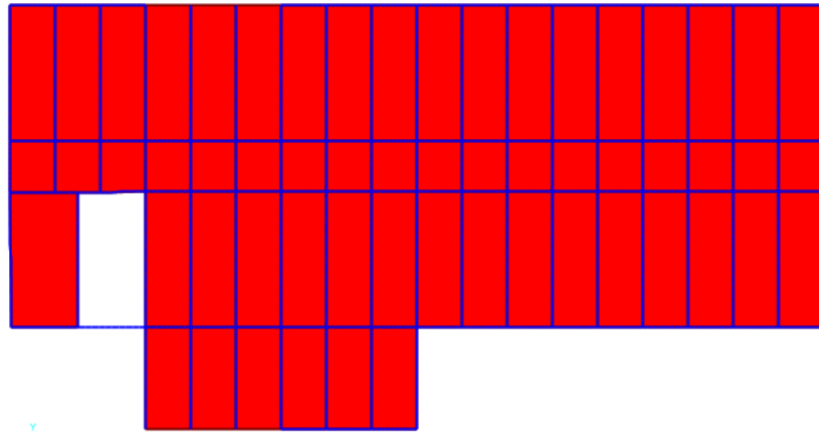
Dari **Tabel 4.34** diatas dapat diperhatikan bahwa bentuk ragam pertama nilai UY dominan dibandingkan UX dan RZ, nilai tersebut menunjukkan bahwa struktur translasi ke arah Y.



Gambar 4.42 Mode Shape 1 Translasi

b. Mode Shape 2 Translasi

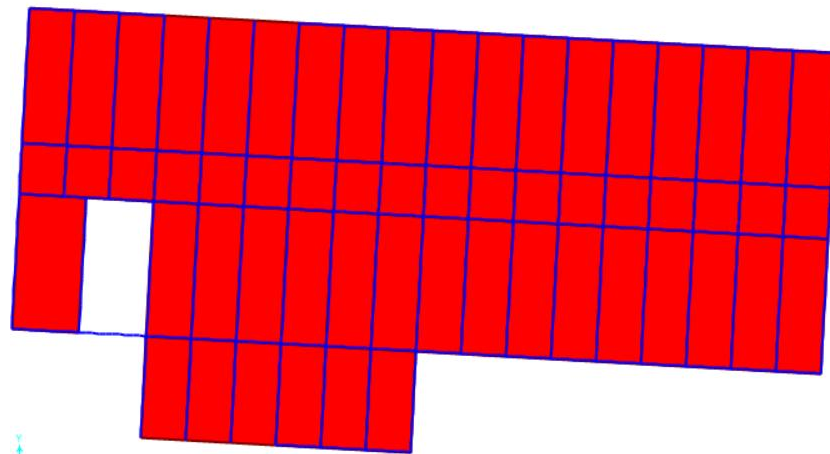
Dari **Tabel 4.34** diatas dapat diperhatikan bahwa bentuk ragam kedua nilai UX dominan dibandingkan UY dan RZ, nilai tersebut menunjukkan bahwa struktur translasi ke arah X.



Gambar 4.43 Mode Shape 2 Translasi

c. Mode Shape 3 Rotasi

Dari **Tabel 4.34** diatas dapat diperhatikan bahwa bentuk ragam keenam nilai RZ dominan dibandingkan UX dan UY, nilai tersebut menunjukkan bahwa struktur mengalami rotasi.



Gambar 4.44 Mode Shape 3 Rotasi

4.2.4 Pemeriksaan Geser Dasar V_{Statik} VS V_{Dinamik}

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.9.1.4 tentang skala gaya, dijelaskan bahwa gaya geser dasar hasil analisis dinamik harus lebih besar dari 100% gaya geser dasar statik, dengan persamaan $V_D > 100\% V_S$ atau

juga bisa mengikuti persyaratan $V_{\text{dinamik}} \geq V_{\text{statik}}$. Apabila kondisi tersebut belum terpenuhi, maka perlu dilakukan penyesuaian skala gaya pada model struktur gedung.

Untuk memeriksa apakah ketentuan tersebut sudah dipenuhi oleh struktur yang dimodelkan, langkah-langkahnya adalah dengan memilih menu *Run* → *Display* → *Show Table*. Pada kotak dialog *Choose Tables for Display*, pilih *Analysis Result* → *Structure Output* → *Base Reactions* → *Table: Base Reactions*, kemudian pada opsi *Load Cases (Results)*, pilih *DQX*, *DQY*, *SQX*, dan *SQY*. Hasilnya dapat dilihat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.45 dan Gambar 4.46.



Gambar 4.45 Seleksi Load Case Perhitungan Geser Dasar (Bangunan Retrofitting)

TABLE: Base Reactions				
OutputCase	CaseType	StepType	GlobalFX	GlobalFY
Text	Text	Text	KN	KN
SQX	LinStatic		-16562.99	0.00
SQY	LinStatic		0.00	-14075.36
DQX	LinRespSpec	Max	11758.68	1388.43
DQY	LinRespSpec	Max	1388.43	10714.16

Gambar 4.46 Output Geser Dasar (Bangunan Retrofitting)

Tabel 4.38 Base Reaction Statik dan Dinamik (Bangunan Retrofitting)

TABEL BASE REACTION				
Output Case	Case Type	Step Type	Global FX	Global FY
			kN	kN
SQX	Linear Static		-16562.99	0.00
SQY	Linear Static		0.00	-14075.36
DQX	Linear Respons Spectrum	Max	11758.68	1388.43
DQY	Linear Respons Spectrum	Max	1388.43	10714.16

Tabel 4.39 Hasil Perhitungan Geser Dasar (Bangunan Retrofitting)

Gaya Gempa	V _x	V _y
Statik	16562.99	14075.36
Dinamik	11758.68	10714.16
V _{statik} ≥ V _{dinamik} (NOT OK)		
V _{statik} / V _{dinamik}	1.41	1.31
Scale Faktor Awal	2.102	2.102
Scale Faktor Koreksi	2961	2761
Hasil Scale		
Statik	16562.99	14075.36
Dinamik	16563.17	14075.19
V _{statik} ≥ V _{dinamik} (OK)		

Hasil perhitungan awal menunjukkan bahwa nilai gaya geser dasar statik masih lebih besar dari gaya geser dasar dinamik, sehingga belum memenuhi ketentuan SNI. Oleh karena itu, dilakukan penskalaan respons spektrum menggunakan faktor skala awal dan faktor skala koreksi. Setelah proses penskalaan, diperoleh nilai gaya geser dasar dinamik yang telah disesuaikan sehingga memenuhi persyaratan $V_{dinamik} \geq V_{statik}$ sesuai dengan ketentuan SNI 1726:2019.

4.2.5 Pemeriksaan Simpangan Antar Tingkat (*Story Drift*) - Bangunan *Retrofitting*

Pada bangunan hasil *retrofitting*, pemeriksaan simpangan antar tingkat tetap mengacu pada ketentuan SNI 1726:2019, khususnya Pasal 7.8.6 dan Pasal 7.12.1, yang mengatur definisi simpangan antar lantai desain serta batas simpangan yang diizinkan. Meskipun sistem struktur telah dimodifikasi dengan penambahan dinding geser, pemeriksaan simpangan antar lantai tetap diperlukan untuk memastikan bahwa peningkatan kekakuan yang dihasilkan benar-benar memberikan kinerja deformasi yang lebih baik dibandingkan kondisi eksisting.

Untuk sistem dinding geser pada struktur dengan Klasifikasi Desain Seismik (KDS) D dan kategori risiko IV, nilai simpangan antar tingkat desain tidak boleh melebihi batas Δ_a/ρ pada setiap tingkat bangunan. Oleh karena itu, nilai simpangan antar lantai ditentukan menggunakan persamaan berikut:

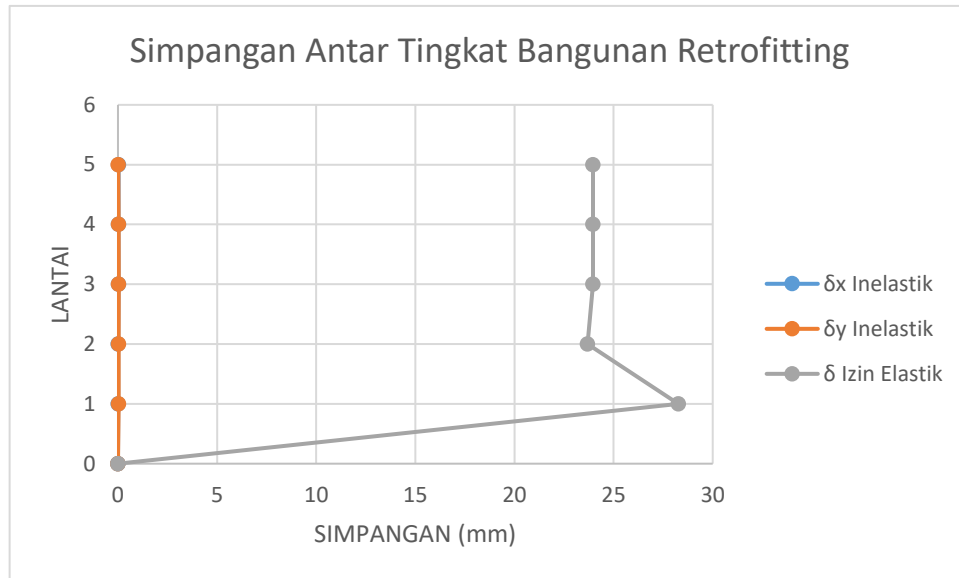
$$\Delta_a = \frac{0,007 \, h x}{\rho} \quad \text{Persamaan 9}$$

Tabel 4.40 Simpangan Antar Tingkat Bangunan *Retrofitting*

Lantai	h (mm)	Displacement		δx <i>inelastik</i> (mm)	δy <i>inelastik</i> (mm)	δ <i>Izin inelastik</i> (mm)	Cek
		δx	δy				
		(mm)	(mm)				
5	4450	0.0070	0.0057	0.02550	0.02079	23.96154	OK
4	4450	0.0074	0.0096	0.02697	0.03510	23.96154	OK
3	4450	0.0073	0.0106	0.02672	0.03893	23.96154	OK
2	4400	0.0061	0.0096	0.02252	0.03533	23.69231	OK
1	5250	0.0039	0.0072	0.01433	0.02643	28.26923	OK
0	0	0.0	0.0	0	0	0	OK

Simpangan antar tingkat (*story drift*) pada bangunan *retrofitting* di setiap lantai diperoleh dari hasil analisis beban gempa. Nilai simpangan pada arah X (δx) dan arah Y (δy) digunakan dalam penentuan simpangan inelastik dengan mempertimbangkan faktor modifikasi respons struktur. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa pada seluruh lantai, nilai

simpangan inelastik lebih kecil dibandingkan dengan simpangan inelastik yang diizinkan, sehingga kinerja struktur bangunan retrofitting dinyatakan memenuhi ketentuan (OK) terhadap batasan simpangan antar tingkat sesuai SNI 1726:2019.



Gambar 4.47 Simpangan Antar Tingkat Bangunan Retrofitting

4.2.6 Pengecekan Pengaruh P-Delta Bangunan Retrofitting

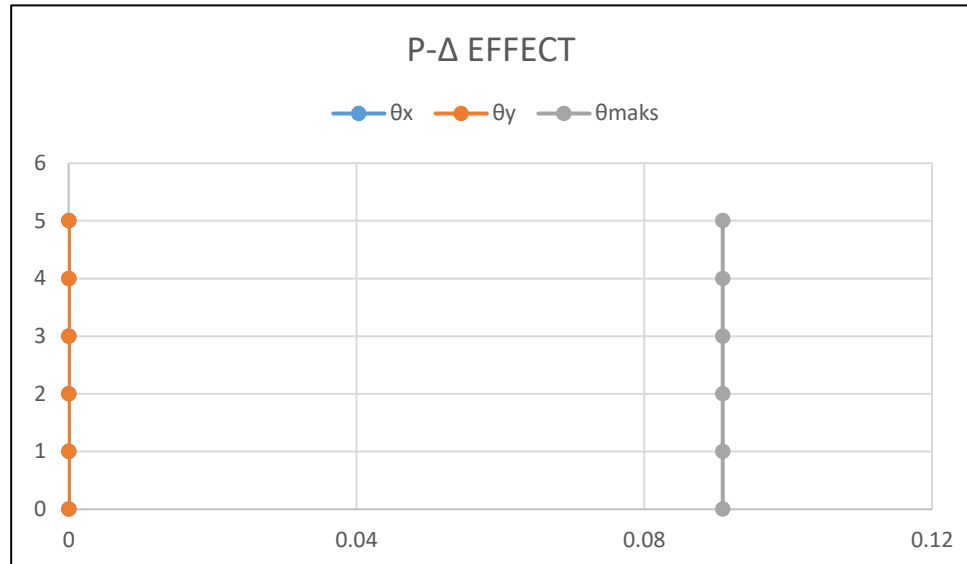
Dengan menggunakan hasil output dari SAP2000, perhitungan pengaruh P-Delta pada bangunan eksisting dirangkum pada tabel berikut.

Tabel 4.41 P-Delta Bangunan Retrofitting

Story	h (mm)	δx (mm)	δy (mm)	V_x (kN)	V_y (kN)	P (kN)	θ_x	θ_y	θ_{maks}	CEK
5	4400	0.00696	0.00567	3.243	3362.40	4403.60	0.0000006	0.0000000	0.091	OK
4	4450	0.00736	0.00957	4.833	6765.60	19118.40	0.0000018	0.0000002	0.091	OK
3	4450	0.00729	0.01062	4.429	7382.30	33014.70	0.0000033	0.0000003	0.091	OK
2	4400	0.00614	0.00964	4.392	8286.20	48930.20	0.0000042	0.0000004	0.091	OK
1	5250	0.00391	0.00721	3.132	7207.00	61374.50	0.0000040	0.0000003	0.091	OK
0	0	0.00000	0.00000	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.091	OK

Pemeriksaan dilakukan dengan menggunakan parameter stabilitas θ , yang merepresentasikan pengaruh gaya aksial vertikal (P) dan simpangan lateral struktur terhadap kestabilan bangunan. Nilai θ pada arah X (θ_x) dan arah Y (θ_y) pada setiap tingkat dibandingkan dengan nilai θ maksimum (θ_{maks}) sesuai dengan ketentuan SNI 1726:2019. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa seluruh nilai θ berada di bawah θ_{maks} , sehingga efek

P-Delta masih berada dalam batas yang diperkenankan dan struktur bangunan retrofitting dinyatakan stabil serta memenuhi persyaratan SNI 1726:2019.



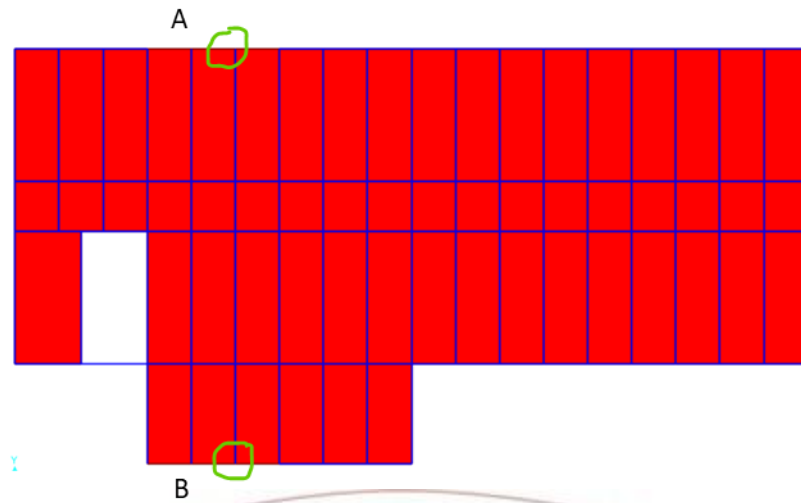
Tabel 4.42 P-Delta Bangunan Retrofitting

4.2.7 Pemeriksaan Ketidakberaturan Horizontal Bangunan Retrofitting

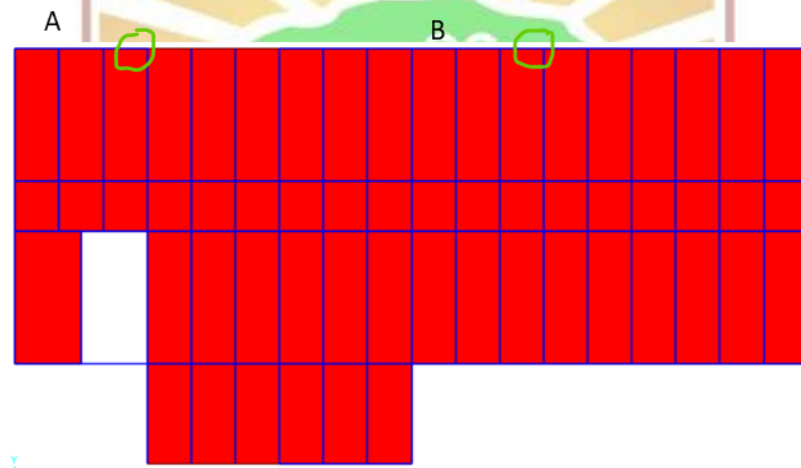
Pengecekan ketidakberaturan horizontal dan vertikal berdasarkan (SNI 1726:2019, 2019) pada Pasal 7.3.2. Terdapat beberapa pemeriksaan ketidakberaturan horizontal yang harus diperhatikan dalam perencanaan bangunan, antara lain:

4.2.7.1 Ketidakberaturan Torsi dan Torsi Berlebihan

Setelah dilakukan pemeriksaan didapatkan hasil seperti pada gambar dan tabel dibawah.



Gambar 4.48 Titik Acuan Ketidakberaturan Horizontal (Arah X)



Gambar 4.49 Titik Acuan Ketidakberaturan Horizontal (Arah Y)

Tabel 4.43 Pengecekan Ketidakberaturan Torsi (Arah X)

Lantai	Arah X								
	Displacement (mm)		Simpangan Antar Tingkat (mm)		Δ Avg (mm)	Δ Max (mm)	Δ avg/ Δ max	Cek Tipe 1a	Cek Tipe 1b
	δ A	δ B	Δ A	Δ B					
5	34.666	27.714	7.262	6.127	6.694	7.262	0.922	Regular	Regular
4	27.404	21.588	7.827	6.512	7.170	7.827	0.916	Regular	Regular
3	19.577	15.075	10.891	3.517	7.204	10.891	0.661	Regular	Regular
2	8.686	11.559	5.274	6.959	6.116	6.959	0.879	Regular	Regular
1	3.412	4.600	3.412	4.600	4.006	4.600	0.871	Regular	Regular

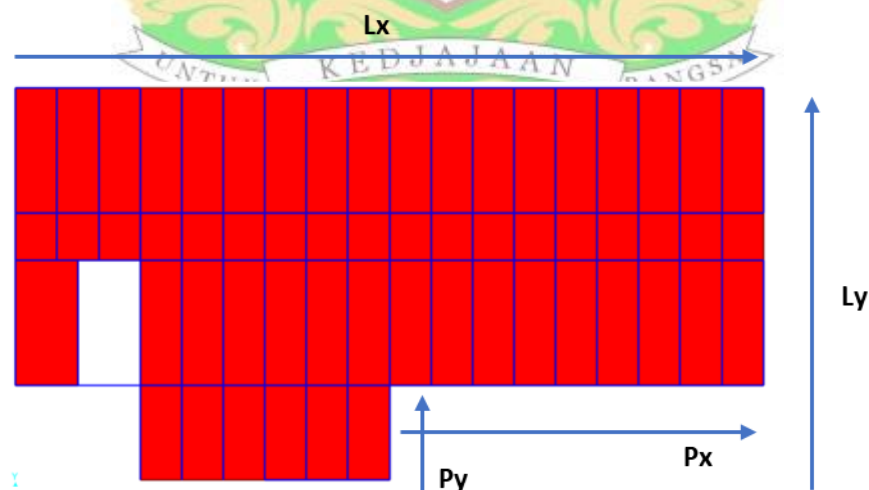
Tabel 4.44 Pengecekan Ketidakberaturan Torsi (Arah Y)

Lantai	Arah Y								
	Displacement (mm)		Simpangan Antar Tingkat (mm)		Δ_{Avg} (mm)	Δ_{Max} (mm)	$\Delta_{avg}/\Delta_{max}$	Cek Tipe 1a	Cek Tipe 1b
	δA	δB	ΔA	ΔB					
5	67.970	58.396	9.634	7.985	8.810	9.634	0.914	Regular	Regular
4	58.336	50.411	13.753	11.736	12.745	13.753	0.927	Regular	Regular
3	44.582	38.675	16.412	14.209	15.311	16.412	0.933	Regular	Regular
2	28.170	24.467	15.728	13.864	14.796	15.728	0.941	Regular	Regular
1	12.442	10.602	12.442	10.602	11.522	12.442	0.926	Regular	Regular

Berdasarkan hasil evaluasi ketidakberaturan torsi pada arah X dan Y, diperoleh bahwa seluruh lantai pada struktur retrofitting memenuhi kriteria ketidakberaturan torsi Tipe 1a dan Tipe 1b. Oleh karena itu, struktur dikategorikan sebagai struktur yang regular terhadap torsi pada arah X dan Y. Dengan demikian, bangunan hasil retrofitting tidak mengalami ketidakberaturan torsi dan telah memenuhi ketentuan SNI 1726:2019.

4.2.7.2 Ketidakberaturan Sudut Dalam

Tabel 13 pada SNI 1726:2019 menyatakan bahwa terdapat ketidakberaturan sudut dalam apabila dimensi proyek gambar struktur dari sudut dalam lebih besar dari 15% dari kedua arah dimensi yang ditinjau



Gambar 4.50 Ketidakberaturan Sudut Dalam

Tabel 4.45 Pengecekan Ketidakberaturan Sudut Dalam Sumbu X dan Y

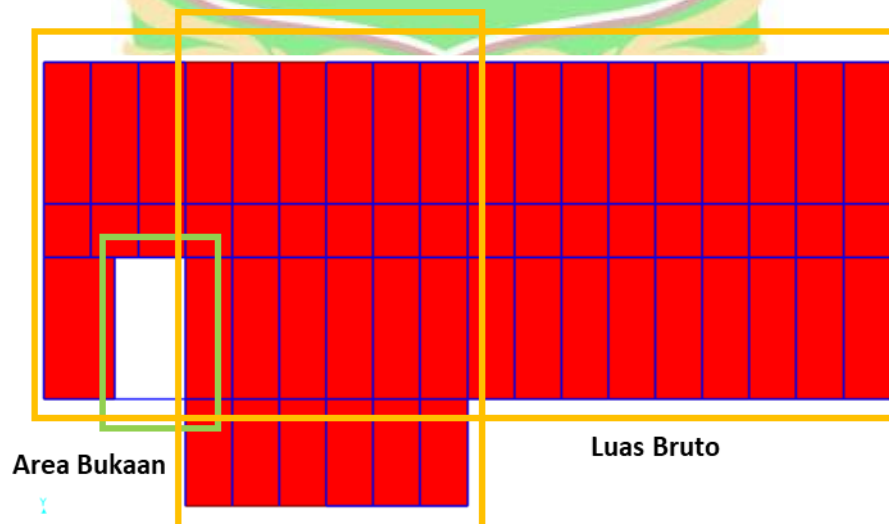
Sumbu X Bangunan		
Lx	48	m
Px	24	m
Px/Lx	50%	Irregular

Sumbu Y Bangunan		
Ly	27	m
Py	6	m
Py/Ly	22%	Irregular

Berdasarkan hasil evaluasi ketidakberaturan sudut dalam pada arah X dan Y, bangunan retrofitting menunjukkan rasio sebesar 50% pada arah X dan 22% pada arah Y. Nilai rasio tersebut melampaui batas ketentuan ketidakberaturan sudut dalam sebesar 15%, sehingga bangunan retrofitting diklasifikasikan sebagai struktur yang tidak beraturan secara horizontal pada kedua arah. Dengan demikian, bangunan retrofitting termasuk dalam kategori ketidakberaturan horizontal sudut dalam.

4.2.7.3 Ketidakberaturan Diskontinuitas Diafragma

Ketidakberaturan ini dinyatakan oleh SNI 1726:2019 apabila terjadi luas bukaan diafragma yang melebihi 50% dari total luas diafragma pada suatu lantai.



Gambar 4.51 Ketidakberaturan Diskontinuitas Diafragma

Tabel 4.46 Pengecekan Ketidakberaturan Diskontinuitas Diafragma

Syarat Rasio Bukaannya < 50%		
Atotal	1008	m ²
Abukaan	32	m ²
Persentase	3%	Regular

Berdasarkan hasil evaluasi ketidakberaturan diskontinuitas diafragma, diperoleh persentase luas bukaan sebesar 3% terhadap luas total lantai. Nilai tersebut berada di bawah batas maksimum yang disyaratkan sebesar 50%, sehingga struktur tidak mengalami ketidakberaturan diskontinuitas diafragma dan dikategorikan sebagai struktur yang regular. Dengan demikian, diafragma lantai masih berfungsi secara efektif dalam menyalurkan gaya gempa sesuai dengan ketentuan SNI 1726:2019.

4.2.7.4 Ketidakberaturan Akibat Pergeseran Tegak Lurus Terhadap Bidang

Ketidakberaturan ini dinyatakan ada apabila terdapat elemen pemikul gaya yang tidak tegak lurus dari lantai atas hingga bawah. Pada penelitian ini tidak terdapat ketidakberaturan horizontal ini.

4.2.7.5 Ketidakberaturan Sistem Nonparalel

Ketidakberaturan ini terjadi apabila elemen pemikul gaya lateral tidak sejajar dengan sumbu utama dari sistem pemikul seismik. Pada penelitian ini tidak terdapat ketidakberaturan ini pada model yang direncanakan.

Berikut rekap hasil pengecekan ketidakberaturan vertikal bisa dilihat pada tabel dibawah.

Tabel 4.47 Rekap Hasil Pengecekan Ketidakberaturan Horizontal

PENGECEKAN KETIDAKBERATURAN HORIZONTAL			
No	Tipe dan Penjelasan Ketidakberaturan	Pasal SNI	Ada/Tidak
1a.	Ketidakberaturan torsi didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimum, yang dihitung termasuk torsi tak terduga dengan $A_x = 1,0$, di salah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu adalah lebih dari 1,2 kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung	7.3.3.4 7.7.3 7.8.4.3 7.1.2.1	Tidak

	struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur di mana diafragmanya kaku atau setengah kaku.	Tabel 16 11.3.4	
1b.	Ketidakberaturan torsi berlebihan didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimum yang dihitung termasuk akibat torsi tak terduga dengan $A_x = 1,0$, di salah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu adalah lebih dari 1,4 kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi berlebihan dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur di mana diafragmanya kaku atau setengah kaku.	7.3.3.1 7.3.3.4 7.3.4.2 7.7.3 7.8.4.3 7.1.2.1 Tabel 16 11.3.4	Tidak
2.	Ketidakberaturan sudut dalam didefinisikan ada jika kedua dimensi proyeksi denah struktur dari lokasi sudut dalam lebih besar dari 15% dimensi denah struktur dalam arah yang ditinjau.	7.3.3.4 Tabel 16	Ada
3.	Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma didefinisikan ada jika terdapat suatu diafragma yang memiliki diskontinuitas atau variasi kekakuan mendadak, termasuk yang mempunyai daerah terpotong atau terbuka lebih besar dari 50 % daerah diafragma bruto yang tertutup, atau perubahan kekakuan diafragma efektif lebih dari 50% dari suatu tingkat ke tingkat selanjutnya.	7.3.3.4 Tabel 16	Tidak
4.	Ketidakberaturan akibat pergeseran tegak lurus terhadap bidang didefinisikan ada jika terdapat diskontinuitas dalam lintasan tahanan gaya lateral, seperti pergeseran tegak lurus terhadap bidang pada setidaknya satu elemen vertikal pemikul gaya lateral.	7.3.3.3 7.3.3.4 7.7.3 Tabel 16	Tidak
5.	Ketidakberaturan sistem nonparalel didefinisikan ada jika elemen vertikal pemikul gaya lateral tidak paralel terhadap sumbu sumbu ortogonal utama sistem pemikul gaya seismik.	7.5.3 7.7.3 Tabel 16 11.3.4	Tidak

4.2.8 Pemeriksaan Ketidakberaturan Vertikal Bangunan Retrofitting

Pengecekan ketidakberaturan horizontal dan vertikal berdasarkan (SNI 1726:2019, 2019) pada Pasal 7.3.2. Terdapat beberapa pemeriksaan ketidakberaturan vertikal yang harus diperhatikan dalam perencanaan bangunan, antara lain:

4.2.8.1 Ketidakberaturan Tingkat Lunak dan Lunak Berlebihan

Apabila kekakuan sebuah tingkat lebih kecil dari 70% kekakuan tingkat di atasnya atau kecil dari 80% kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya untuk tipe 1a. Sementara tipe 1b yaitu torsi berlebihan terjadi apabila sebuah lantai kurang dari 60% kekakuan tingkat di atasnya atau kecil dari 70% kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.

Hasil pemeriksaan ketidakberaturan ini dapat dilihat pada tabel dibawah. Hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa tidak terdapat ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak ini.

Tabel 4.48 Pengecekan Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak Arak X

Arah X								
Joint	Elevasi	Fx	Vx	U1	Δi	K	Cek Tipe 1a	Cek Tipe 1b
	(mm)	(kN)	(kN)	(mm)	(mm)	(kN/mm)		
410	23000	1	1	0.008526	0.008526	117.288		
327	18550	1	2	0.006732	0.001892	1057.082	Regular	Regular
244	14100	1	3	0.004840	0.001914	1567.398	Regular	Regular
148	9650	1	4	0.002926	0.001682	2378.121	Regular	Regular
54	5250	1	5	0.001244	0.001244	4019.293	Regular	Regular
229	0	0		0	0			

Tabel 4.49 Pengecekan Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak Arak Y

Arah Y								
Joint	Elevasi	Fy	Vy	U2	Δi	K	Cek Tipe 1a	Cek Tipe 1b
	(mm)	(kN)	(kN)	(mm)	(mm)	(kN/mm)		
410	23000	1	1	0.018362	0.002320	431.034		
327	18550	1	2	0.016042	0.003335	599.700	Regular	Regular
244	14100	1	3	0.012707	0.004184	717.017	Regular	Regular
148	9650	1	4	0.008523	0.004486	891.663	Regular	Regular
54	5250	1	5	0.004037	0.004037	1238.543	Regular	Regular
229	0	0		0	0			

Berdasarkan hasil evaluasi ketidakberaturan tingkat lunak pada arah X dan Y, nilai kekakuan lateral (K) pada setiap tingkat menunjukkan kecenderungan meningkat ke arah bawah bangunan tanpa adanya indikasi penurunan kekakuan. Hasil pemeriksaan pada seluruh tingkat menunjukkan bahwa struktur termasuk dalam klasifikasi regular terhadap ketentuan ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak (Tipe 1a dan Tipe 1b).

Dengan demikian, struktur tidak mengalami ketidakberaturan tingkat lunak pada arah X dan telah memenuhi persyaratan SNI 1726:2019.

4.2.8.2 Ketidakberaturan Berat (Massa)

Ketidakberaturan ini terdapat apabila massa suatu lantai lebih dari 150% dari massa lantai dekatnya.

Berikut hasil pemeriksaan ketidakberaturan ini pada tabel berikut. Dari tabel terlihat terdapat ketidakberaturan massa pada model.

Tabel 4.50 Pengecekan Ketidakberaturan Berat (Massa)

Lantai	Berat (kN)	Cek Tipe 2
5	4435.352	Regular
4	6724.224	Irregular
3	6724.224	Regular
2	7675.39	Regular
1	8620.281	Regular

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa struktur mengalami ketidakberaturan massa secara vertikal, karena terdapat satu tingkat bangunan yang tidak memenuhi persyaratan ketentuan ketidakberaturan massa sebagaimana diatur dalam SNI 1726:2019.

4.2.8.3 Ketidakberaturan Geometri Vertikal

Menurut SNI 1726:2019 pada tabel 14, ketidakberaturan ini ada apabila dimensi horizontal dari elemen pemikul gaya gempa lebih dari 130% dimensi dari tingkat didekatnya.

Hasil pemeriksaan dapat dilihat pada tabel dibawah ini. Dari tabel terlihat bahwa tidak ada ketidakberaturan ini pada model bangunan.

Tabel 4.51 Pengecekan Ketidakberaturan Geometri Vertikal Arah X

Lantai	Arah X	
	Lebar Portal (m)	Cek Tipe 3
5	24	Regular
4	48	Irregular
3	48	Regular
2	48	Regular
1	48	Regular

Tabel 4.52 Pengecekan Ketidakberaturan Geometri Vertikal Arah Y

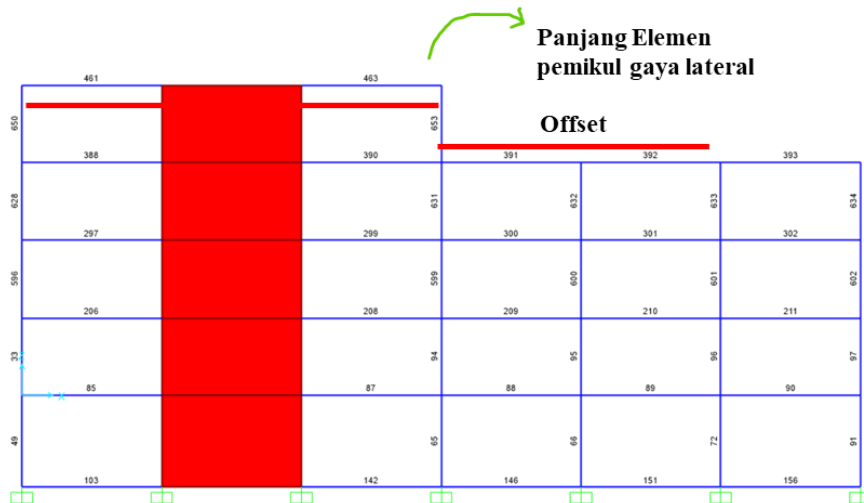
Lantai	Arah Y	
	Lebar Portal (m)	Cek Tipe 3
5	27	Regular
4	27	Regular
3	27	Regular
2	27	Regular
1	27	Regular

Berdasarkan hasil evaluasi ketidakberaturan geometri vertikal sesuai dengan ketentuan SNI 1726:2019, struktur bangunan pada arah X menunjukkan adanya ketidakberaturan geometri vertikal (Tipe 3) pada lantai 4 akibat perbedaan lebar portal yang signifikan dibandingkan dengan lantai di atasnya. Sementara itu, lantai-lantai lainnya pada arah X diklasifikasikan sebagai struktur yang regular.

Pada arah Y, hasil evaluasi menunjukkan bahwa seluruh lantai memiliki lebar portal yang relatif seragam, sehingga tidak ditemukan ketidakberaturan geometri vertikal (Tipe 3). Dengan demikian, struktur bangunan pada arah Y dapat dikategorikan sebagai struktur yang regular terhadap ketentuan ketidakberaturan geometri vertikal.

4.2.8.4 Ketidakberaturan Akibat Diskontinuitas Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral

Ketidakberaturan ini ada apabila terdapat pergeseran arah elemen pemikul gaya lateral yang lebih besar dari panjang elemen tersebut atau terdapat reduksi kekakuan pada elemen di tingkat dibawahnya.



Gambar 4.52 Ketidakberaturan Arah Akibat Diskontinuitas Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral

Tabel 4.53 Ketidakberaturan Arah Akibat Diskontinuitas Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral Arah X

Arah X			
Lantai	Panjang Elemen (m)	Offset (m)	Cek Tipe 3
5	24	16	Regular
4	48	0	Regular
3	48	0	Regular
2	48	0	Regular
1	48	0	Regular

Tabel 4.54 Ketidakberaturan Arah Akibat Diskontinuitas Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral Arah Y

Arah Y			
Lantai	Panjang Elemen (m)	Offset (m)	Cek Tipe 3
5	19	8	Regular
4	19	8	Regular
3	27	0	Regular
2	27	0	Regular
1	27	0	Regular

Berdasarkan hasil evaluasi ketidakberaturan akibat diskontinuitas elemen vertikal pemikul gaya lateral sesuai SNI 1726:2019, struktur bangunan pada arah X dan Y diklasifikasikan sebagai struktur regular. Meskipun terdapat offset pada beberapa lantai, nilainya masih berada dalam batas yang diperkenankan sehingga tidak menimbulkan ketidakberaturan

struktural. Dengan demikian, struktur bangunan pada kedua arah memenuhi ketentuan perencanaan gempa berdasarkan SNI 1726:2019.

4.2.8.5 Ketidakberaturan Tingkat Lemah dan Lemah Berlebihan Akibat Diskontinuitas Pada Kekuatan Lateral Tingkat

Ketidakberaturan tingkat lemah berlaku apabila terdapat kekakuan dari suatu tingkat kurang dari 80% atau 60% dari kekakuan lateral dari tingkat di atasnya. Hasil pemeriksaan ketidakberaturan ini dapat dilihat pada tabel dibawah.

Tabel 4.55 Ketidakberaturan Tingkat Lemah dan Tingkat Lemah Berlebih (Arah X)

Arah X									
Lantai	Berat (kN)	h (m)	k	W.h ^k	Cv	Vx	Vi/Vi+1	Cek Tipe 5a	Cek Tipe 5b
5	4435.352	23	1.109	143472.41	0.24307	0.24307			
4	6724.224	18.55	1.109	171372.59	0.29033	0.53340	2.194	Regular	Regular
3	6724.224	14.1	1.109	126432.75	0.21420	0.74760	1.402	Regular	Regular
2	7675.39	9.65	1.109	94779.16	0.16057	0.90817	1.215	Regular	Regular
1	8620.281	5.25	1.109	54201	0	1.00000	1.101	Regular	Regular
Total	34179.471			590258.38	1				

Tabel 4.56 Ketidakberaturan Tingkat Lemah dan Tingkat Lemah Berlebih (Arah Y)

Arah Y									
Lantai	Berat (kN)	h (m)	k	W.h ^k	Cv	Vy	Vi/Vi+1	Cek Tipe 5a	Cek Tipe 5b
5	4435.352	23	1.109	143472.41	0.24307	0.24307			
4	6724.224	18.55	1.109	171372.59	0.29033	0.53340	2.194	Regular	Regular
3	6724.224	14.1	1.109	126432.75	0.21420	0.74760	1.402	Regular	Regular
2	7675.39	9.65	1.109	94779.16	0.16057	0.90817	1.215	Regular	Regular
1	8620.281	5.25	1.109	54201	0	1.00000	1.101	Regular	Regular
Total	34179.471			590258.38	1				

Berdasarkan hasil evaluasi ketidakberaturan tingkat lemah (Tipe 5a) dan tingkat lemah berlebihan (Tipe 5b) sesuai SNI 1726:2019, rasio gaya geser antar lantai (V_i/V_{i+1}) pada arah X dan Y berada dalam batas yang diizinkan pada seluruh tingkat. Dengan demikian, struktur tidak mengalami ketidakberaturan tingkat lemah maupun tingkat lemah berlebihan dan diklasifikasikan sebagai struktur reguler.

Berikut rekap hasil pengecekan ketidakberaturan vertikal bisa dilihat pada tabel dibawah.

Tabel 4.57 Rekap Hasil Pengecekan Ketidakberaturan Vertikal

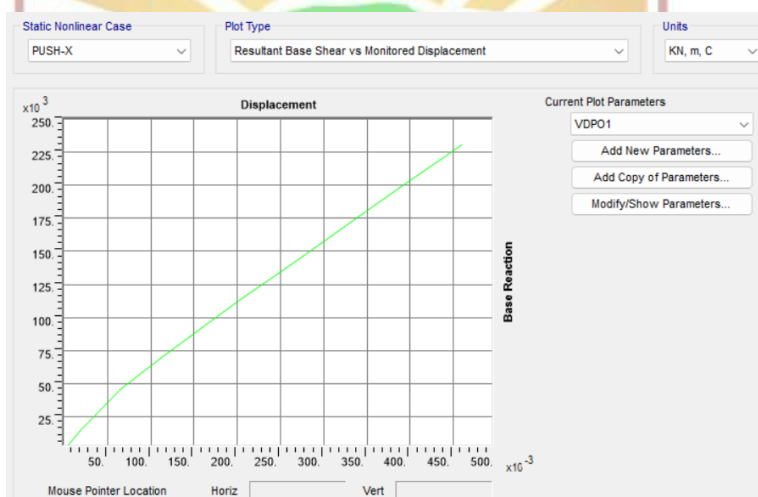
PENGECEKAN KETIDAKBERATURAN VERTIKAL			
No	Tipe dan Penjelasan Ketidakberaturan	Pasal SNI	Ada/Tidak
1a.	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak didefinisikan jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 70 % kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80 % kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	Tabel 16	Tidak
1b.	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak Berlebihan didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 60 % kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 70 % kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	7.3.3.1 Tabel 16	Tidak
2.	Ketidakberaturan Berat (Massa) didefinisikan ada jika massa efektif di sebarang tingkat lebih dari 150 % massa efektif tingkat di dekatnya. Atap yang lebih ringan dari lantai di bawahnya tidak perlu ditinjau.	Tabel 16	Ada
3.	Ketidakberaturan Geometri Vertikal didefinisikan ada jika dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik di sebarang tingkat lebih dari 130 % dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik tingkat didekatnya.	Tabel 16	Ada
4.	Ketidakberaturan Akibat Diskontinuitas Bidang pada Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral didefinisikan ada jika pergeseran arah bidang elemen pemikul gaya lateral lebih besar dari panjang elemen itu atau terdapat reduksi kekakuan elemen pemikul di tingkat di bawahnya.	7.3.3.3 7.3.3.4 Tabel 16	Tidak
5a.	Ketidakberaturan Tingkat Lemah Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat didefinisikan ada jika kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 80 % kekuatan lateral tingkat di atasnya. Kekuatan lateral tingkat adalah kekuatan total semua elemen pemikul seismik yang berbagi geser tingkat pada arah yang ditinjau.	7.3.3.1 Tabel 16	Tidak
5b.	Ketidakberaturan Tingkat Lemah Berlebihan Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat didefinisikan ada jika kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 65 % kekuatan lateral	7.3.3.1 7.3.3.2 Tabel 16	Tidak

	tingkat di atasnya. Kekuatan lateral tingkat adalah kekuatan total semua elemen pemikul seismik yang berbagi geser tingkat pada arah yang ditinjau.		
--	---	--	--

4.2.9 Analisis Statik Nonlinear Pushover Analysis (Bangunan Retrofitting)

4.2.9.1 Menampilkan Kurva Pushover (Bangunan Retrofitting)

Untuk menampilkan kurva pushover bangunan eksisting dapat dilakukan dengan klik menu **Display – Show Static Pushover Curve**. Pada **option Static Nonlinear Case** pilih **PUSH-X** untuk *pushover curve* arah x-x, dan kemudian pilih **PUSH-Y** untuk *pushover curve* arah y-y.



Gambar 4.53 Kurva Pushover – X (Bangunan Retrofitting)



Gambar 4.54 Kurva Pushover – Y (Bangunan Retrofitting)

Untuk menampilkan plot-plot kurva pushover, maka klik **File – Display Table**, maka akan muncul plot-plot gaya beserta perpindahannya untuk setiap beban dorong yang diberikan pada bangunan.

LoadCase Text	Step Unitless	Displacement	BaseForce KN	AtoB Unitless	BtoO Unitless	ItoLS Unitless	LStoCP Unitless	CptoC Unitless	CtoD Unitless	DtoE Unitless	BeyondE Unitless	Total Unitless
PUSH-X	0	0.000609	0	2292	0	0	0	0	0	0	0	2292
PUSH-X	1	0.018919	14813.561	2290	2	0	0	0	0	0	0	2292
PUSH-X	2	0.065367	46037.781	1980	312	0	0	0	0	0	0	2292
PUSH-X	3	0.113228	70090.984	1810	482	0	0	0	0	0	0	2292
PUSH-X	4	0.159128	92262.192	1756	536	0	0	0	0	0	0	2292
PUSH-X	5	0.205028	113914.692	1700	592	0	0	0	0	0	0	2292
PUSH-X	6	0.250928	135147.834	1666	626	0	0	0	0	0	0	2292
PUSH-X	7	0.296828	156286.497	1648	618	26	0	0	0	0	0	2292
PUSH-X	8	0.342728	177387.769	1614	632	46	0	0	0	0	0	2292
PUSH-X	9	0.388628	198382.926	1578	650	64	0	0	0	0	0	2292
PUSH-X	10	0.434528	219252.632	1534	640	118	0	0	0	0	0	2292
PUSH-X	11	0.459609	230634.462	1516	604	172	0	0	0	0	0	2292

Gambar 4.55 Output Tabel Push X Bangunan Eksisting

LoadCase Text	Step Unitless	Displacement	BaseForce KN	AtoB Unitless	BtoO Unitless	ItoLS Unitless	LStoCP Unitless	CptoC Unitless	CtoD Unitless	DtoE Unitless	BeyondE Unitless	Total Unitless
PUSH-Y	0	0.000137	0	2292	0	0	0	0	0	0	0	2292
PUSH-Y	1	0.015034	7460.636	2290	2	0	0	0	0	0	0	2292
PUSH-Y	2	0.08147	30756.629	1946	346	0	0	0	0	0	0	2292
PUSH-Y	3	0.12737	41320.376	1778	514	0	0	0	0	0	0	2292
PUSH-Y	4	0.17327	50931.238	1678	614	0	0	0	0	0	0	2292
PUSH-Y	5	0.230645	62478.357	1588	692	12	0	0	0	0	0	2292
PUSH-Y	6	0.276545	71509.303	1516	736	38	0	2	0	0	0	2292
PUSH-Y	7	0.345395	84856.462	1438	756	96	0	2	0	0	0	2292
PUSH-Y	8	0.414245	98007.869	1366	770	154	0	2	0	0	0	2292
PUSH-Y	9	0.459137	106509.491	1348	752	190	0	2	0	0	0	2292

Gambar 4.56 Output Tabel Push Y Bangunan Retrofitting

Dari hasil running pushover analysis, untuk arah x-x didapatkan 11 step pola beban dorong dan di arah y-y 9 step pola beban dorong yang diberikan struktur hingga struktur mengalami keruntuhan.

4.2.9.2 Mekanisme Terjadinya Sendi Plastis (Bangunan Retrofitting)

a. Sendi Plastis Arah x-x

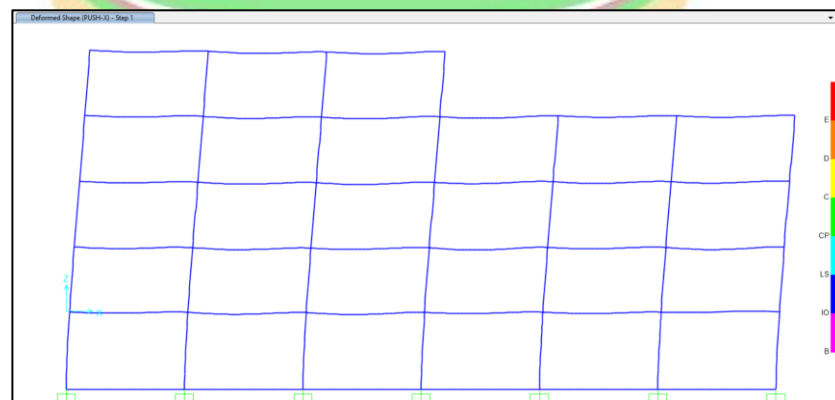
Pembebanan arah x-x (Push-X) struktur berhenti pada step ke-11 dengan *displacement* terbesar 459,42 mm dan gaya geser sebesar 186750,515 kN yang bisa dilihat dari tabel berikut.

Tabel 4.58 Sendi Plastis Arah x-x Bangunan Retrofitting

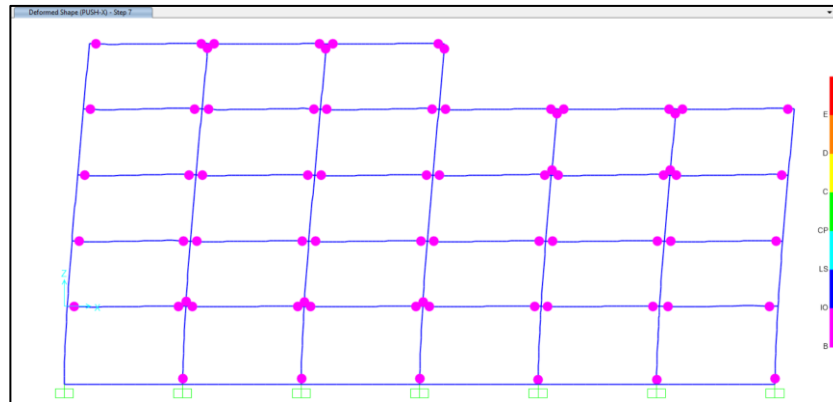
Step	Load Case	Monitored Displacement	Base Force	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	Total
		(mm)	(kN)									
0	PUSH-X	0.61	0	2292	0	0	0	0	0	0	0	2292
1	PUSH-X	18.92	14813.561	2290	2	0	0	0	0	0	0	2292
2	PUSH-X	65.37	46037.781	1980	312	0	0	0	0	0	0	2292
3	PUSH-X	113.23	70090.984	1810	482	0	0	0	0	0	0	2292
4	PUSH-X	159.13	92262.192	1756	536	0	0	0	0	0	0	2292
5	PUSH-X	205.03	113914.692	1700	592	0	0	0	0	0	0	2292
6	PUSH-X	250.93	135147.834	1666	626	0	0	0	0	0	0	2292
7	PUSH-X	296.83	156286.497	1648	618	26	0	0	0	0	0	2292
8	PUSH-X	342.73	177387.769	1614	632	46	0	0	0	0	0	2292
9	PUSH-X	388.63	198382.926	1578	650	64	0	0	0	0	0	2292
10	PUSH-X	434.53	219252.632	1534	640	1118	0	0	0	0	0	2292
11	PUSH-X	459.61	230634.462	1516	604	172	0	0	0	0	0	2292

Dari tabel dapat dilihat bahwa setiap step pola beban dorong akan mempunyai tingkatan plastisifikasi yang berbeda pada masing-masing elemen strukturnya. Pada step ke-1 sampai step ke-6 elemen masih berada pada kondisi A-IO. pada step ke-7 mulai terjadi kondisi IO-LS pada 26 elemen dan meningkat menjadi 172 elemen pada step ke-11. Hal ini menunjukkan bahwa setiap beban dorong pada pushover arah x-x bangunan *retrofitting* yang mengalami kenaikan, maka kondisi plastifikasi pada elemen juga akan meningkat secara bertahap.

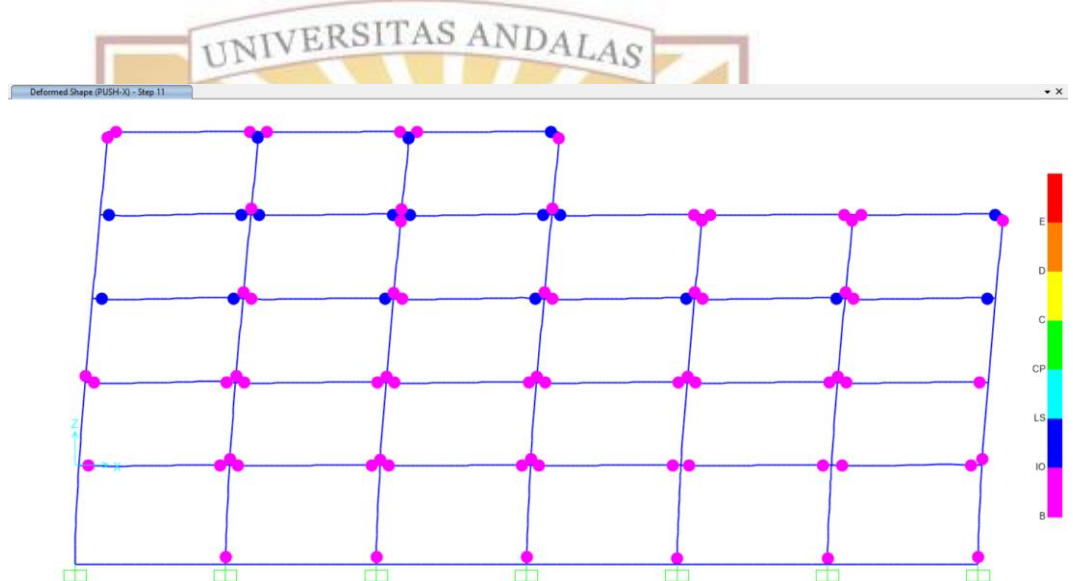
Gambar dibawah ini merupakan lokasi terjadinya sendi plastis pada elemen struktur untuk beban dorong arah x-x.



Gambar 4.57 Distribusi sendi plastis hasil pushover arah X pada bangunan retrofitting (step awal pembebanan)



Gambar 4.58 Distribusi sendi plastis hasil pushover arah X pada bangunan retrofitting (step transisi plastifikasi)



Gambar 4.59 PUSH-X (Step 11) – Distribusi sendi plastis hasil pushover arah X pada bangunan retrofitting (step akhir pushover)

b. Sendi Plastis Arah y-y

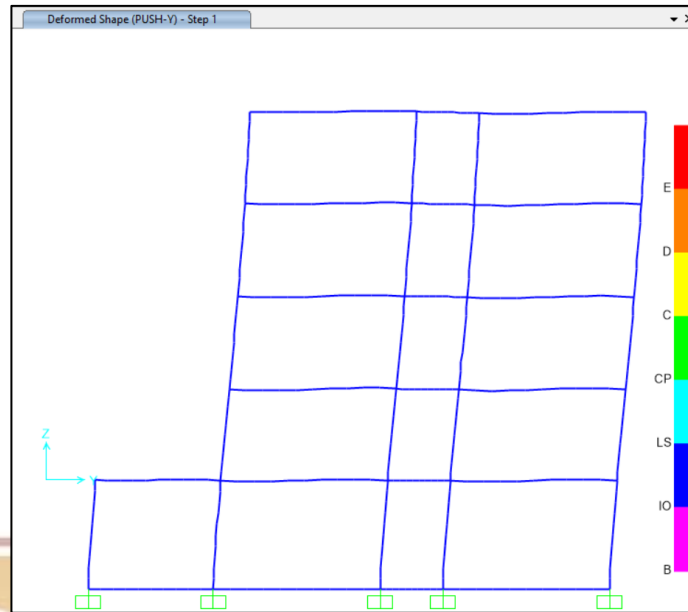
Pembebanan arah x-x (Push-X) struktur berhenti pada step ke-11 dengan *displacement* terbesar 459,42 mm dan gaya geser sebesar 34732,674 kN yang bisa dilihat dari tabel berikut.

Tabel 4.59 Sendi Plastis Arah y-y Bangunan Retrofitting

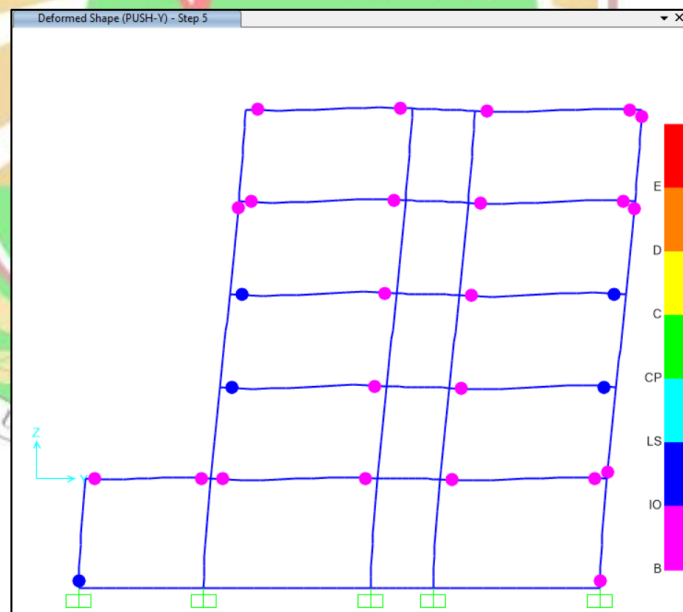
Step	Load Case	Monitored Displacement	Base Force	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	Total
		(mm)	(kN)									
0	PUSH-Y	0.137	0	2292	0	0	0	0	0	0	0	2292
1	PUSH-Y	15.034	7460.636	2290	2	0	0	0	0	0	0	2292
2	PUSH-Y	81.470	30756.629	1946	346	0	0	0	0	0	0	2292
3	PUSH-Y	127.370	41320.376	1778	514	0	0	0	0	0	0	2292
4	PUSH-Y	173.270	50931.238	1678	614	0	0	0	0	0	0	2292
5	PUSH-Y	230.645	62478.357	1588	692	12	0	0	0	0	0	2292
6	PUSH-Y	276.545	71509.303	1516	736	38	0	2	0	0	0	2292
7	PUSH-Y	345.395	84856.462	1438	756	96	0	2	0	0	0	2292
8	PUSH-Y	414.245	98007.869	1366	770	154	0	2	0	0	0	2292
9	PUSH-Y	459.137	106509.491	1348	752	190	0	2	0	0	0	2292

Dari tabel dapat dilihat bahwa setiap step pola beban dorong akan mempunyai tingkatan plastisifikasi yang berbeda pada masing-masing elemen strukturnya. Pada step ke-1 sampai step ke-4 elemen masih berada pada kondisi A-IO. pada step ke-5 mulai terjadi kondisi IO-LS pada 12 elemen dan meningkat menjadi 190 elemen pada step ke-9. Pada step ke-6 sudah mulai terjadi kondisi >CP pada 2 elemen struktur dan stabil sebanyak 2 elemen pada step ke-9. Hal ini menunjukkan bahwa setiap beban dorong pada pushover arah y-y bangunan *retrofitting* yang mengalami kenaikan, maka kondisi plastifikasi pada elemen juga akan meningkat secara bertahap.

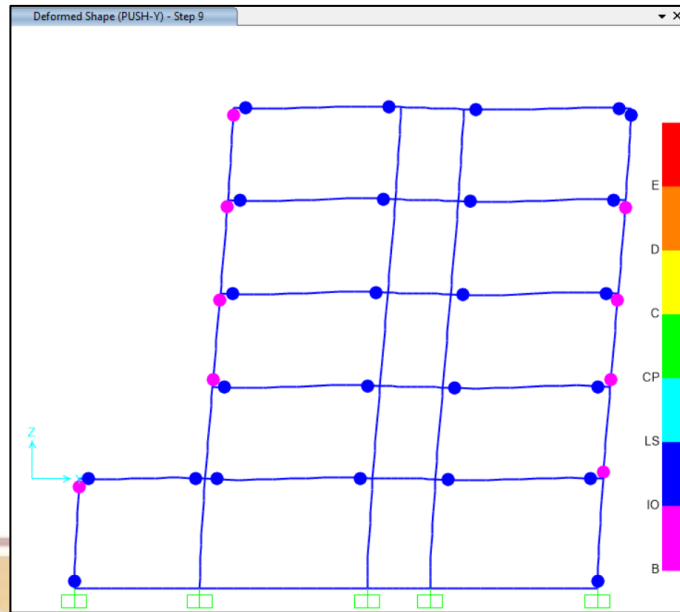
Gambar dibawah ini merupakan lokasi terjadinya sendi plastis pada elemen struktur untuk beban dorong arah y-y.



Gambar 4.60 PUSH-Y (Step 1) – Distribusi sendi plastis hasil pushover arah Y pada bangunan retrofitting (step awal pembebanan)



Gambar 4.61 PUSH-Y Distribusi sendi plastis hasil pushover arah Y pada bangunan retrofitting (step transisi plastifikasi)



Gambar 4.62 Distribusi sendi plastis hasil pushover arah Y pada bangunan retrofitting (step akhir pushover)

4.2.9.3 Level Kinerja Struktur Bangunan Retrofitting

Berbeda dengan evaluasi pada bangunan eksisting yang bertujuan untuk mengidentifikasi tingkat kerentanan struktur terhadap beban gempa, penentuan level kinerja struktur bangunan *retrofitting* difokuskan untuk menilai efektivitas tindakan perkuatan struktur yang telah diterapkan. *Retrofitting* dengan penambahan dinding geser diharapkan mampu meningkatkan kekakuan lateral, kapasitas tahan gempa, serta mengendalikan deformasi struktur akibat beban gempa rencana.

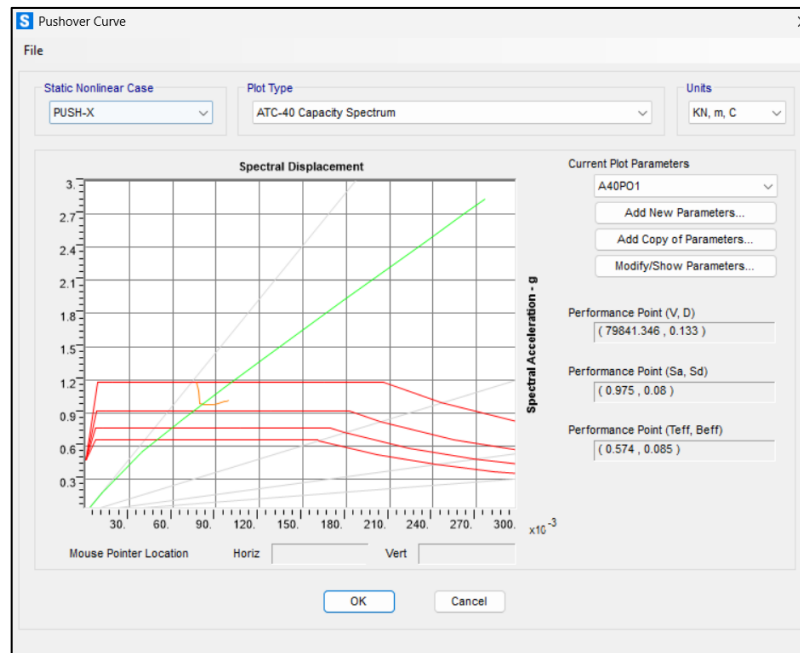
a. Applied Technology Council (ATC) 40

Penentuan level kinerja struktur bangunan *retrofitting* tetap mengacu pada kriteria deformasi global ATC-40, yaitu berdasarkan rasio antara perpindahan atap pada kondisi *performance point* terhadap tinggi total bangunan. Namun demikian, interpretasi hasil pada bangunan *retrofitting* tidak hanya ditujukan untuk mengetahui kondisi kerusakan struktur, melainkan juga untuk membandingkan perubahan respons struktur sebelum dan sesudah dilakukan *retrofitting*.

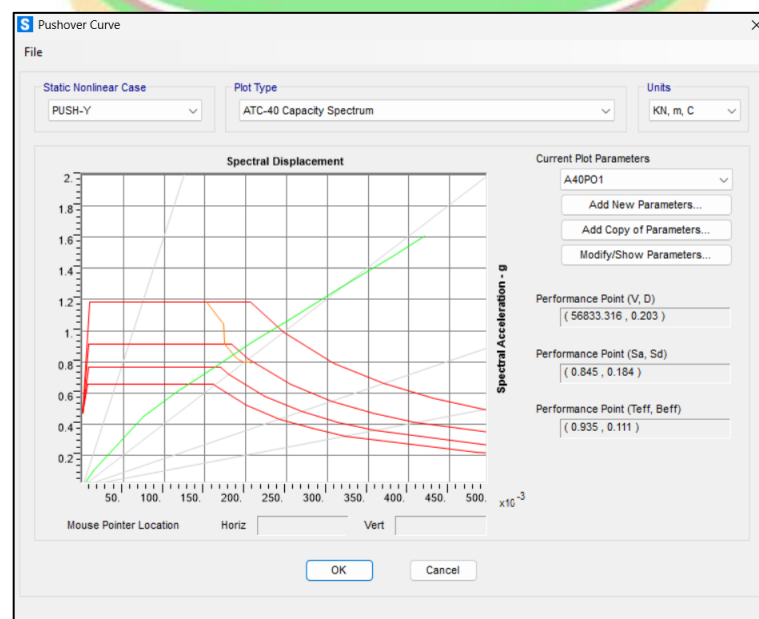
Dengan adanya dinding geser sebagai elemen pemikul gaya lateral tambahan, respons struktur bangunan *retrofitting* diharapkan menunjukkan penurunan simpangan total dan simpangan inelastis, serta

distribusi plastifikasi yang lebih terkendali dibandingkan bangunan eksisting. Oleh karena itu, evaluasi level kinerja struktur pada bangunan *retrofitting* menjadi indikator utama dalam menilai keberhasilan strategi perkuatan yang diterapkan dalam meningkatkan kinerja seismik bangunan.

Hasil dari spektrum kapasitas dari masing-masing arah baik arah-x maupun arah-y adalah sebagai berikut.



Gambar 4.63 Kurva Kapasitas Push-X (Bangunan Retrofitting)



Gambar 4.64 Kurva Kapasitas Push-Y (Bangunan Retrofitting)

Selanjutnya untuk menentukan tingkat kinerja parameter yang diperlukan adalah nilai perpindahan atap saat *performance point* dan nilai perpindahan atap saat beban dorong Step ke-1, dimana tinggi total bangunan = 23 m

Diketahui :

Displacement at roof/*performance point* (Dt)

- $D_{t-x} = 0,133$
- $D_{t-y} = 0,203$

Tinggi Bangunan = 23 m

(H_{total})

Displacement at roof Step ke-1

- $D_{1-x} = 0,0189$
- $D_{1-y} = 0,015$

Berdasarkan hasil analisis pushover pada bangunan yang telah dilakukan *retrofitting* dengan penambahan dinding geser, diperoleh nilai perpindahan atap pada kondisi *performance point* sebesar 0,139 m untuk arah x-x dan 0,337 m untuk arah y-y, dengan tinggi total bangunan 23 m. Nilai perpindahan ini digunakan untuk mengevaluasi simpangan total maksimum dan simpangan inelastis maksimum sebagai indikator utama kinerja seismik struktur berdasarkan kriteria ATC-40.

- Simpangan Total Maksimum

$$\text{Arah } x - x = \frac{D_{t-x}}{H_{total}}$$

$$\text{Arah } x - x = \frac{0,133}{23} = 0,0058 = 0,01 \text{ (Immediate Occupancy)}$$

$$\text{Arah } y - y = \frac{D_{t-y}}{H_{total}}$$

$$\text{Arah } y - y = \frac{0,203}{23} = 0,009 = 0,01 \text{ (Immediate Occupancy)}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa simpangan total maksimum pada arah x-x dan y-y dibawah 0,01, yang termasuk dalam level kinerja *Immediate Occupancy* (IO).

Kondisi ini mengindikasikan bahwa setelah dilakukan *retrofitting*, struktur pada arah x-x dan y-y mengalami deformasi yang sangat kecil, sehingga bangunan tetap aman dan fungsional segera setelah terjadinya gempa.

- Simpangan Inelastis Maksimum

$$\text{Arah } x - x = \frac{D_{t-x} - D_{1-x}}{H_{total}}$$

$$\text{Arah } x - x = \frac{0,133 - 0,0189}{23} = 0,005 = 0,01 \text{ (Immediate Occupancy)}$$

$$\text{Arah } y - y = \frac{D_{t-y} - D_{1-y}}{H_{total}}$$

$$\text{Arah } y - y = \frac{0,203 - 0,015}{23} = 0,008 \text{ (Damage Control)}$$

Evaluasi terhadap simpangan inelastis maksimum menunjukkan nilai dibawah 0,01 untuk arah x-x, yang juga termasuk dalam level kinerja *Immediate Occupancy (IO)*. Hal ini menandakan bahwa perilaku inelastis struktur pada arah tersebut telah berhasil dikendalikan dengan baik melalui penambahan dinding geser. Sementara itu, simpangan inelastis maksimum pada arah y-y sebesar 0,0082, yang masih berada pada level kinerja *Damage Control (DC)* menurut batasan deformasi ATC-40.

Secara keseluruhan, hasil evaluasi kinerja struktur bangunan *retrofitting* menunjukkan bahwa terjadi peningkatan level kinerja dibandingkan bangunan eksisting, khususnya pada arah x-x dan y-y yang berhasil mencapai level *Immediate Occupancy (IO)* baik dari sisi simpangan total. Pada sisi simpangan inelastis maksimum untuk arah x-x yang mencapai level *Immediate Occupancy (IO)* sedangkan arah y-y meskipun struktur masih berada pada level *Damage Control (DC)*, nilai simpangan yang diperoleh menunjukkan kecenderungan penurunan dibandingkan kondisi eksisting

Hal ini mengindikasikan bahwa penerapan dinding geser sebagai metode *retrofitting* telah memberikan kontribusi positif dalam meningkatkan kinerja seismik bangunan

b. FEMA (Federal Emergency Management Agency) 356

Berdasarkan kurva bilinear FEMA 356, dapat diketahui nilai parameter perhitungan level kinerja struktur sebagai berikut :

Tabel 4.60 Parameter Perhitungan Kinerja FEMA 356 (bangunan retrofitting)

Calculate Parameter	Arah X	Arah Y
C ₀	1,3	1,1
C ₁	1,05	1
C ₂	1	1
C ₃	1	1
S _a , (g)	1,1	0,8
Periode Efektif, T _e (sec)	0,5252	0,7238
g	9,81	

Untuk menghitung target perpindahannya menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\delta_{x,y} = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g$$

$$\delta_x = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g$$

$$\delta_x = 1,3 \times 1,05 \times 1 \times 1 \times 1,1 \times \frac{0,5252^2}{4\pi^2} \times 9,81$$

$$\delta_x = 0,1029$$

$$\delta_y = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g$$

$$\delta_y = 1,1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 0,8 \times \frac{0,7238^2}{4\pi^2} \times 9,81$$

$$\delta_y = 0,1145$$

Kontrol Level Kinerja : perpindahan arah x sebesar 0,1029 m dan arah y sebesar 0,1145 m, menghasilkan simpangan relatif sebesar 0,45%

dan 0,49% dari tinggi bangunan. Nilai tersebut berada dalam rentang batas Fully Operational untuk arah x dan arah y.

4.3 Analisis Kurva Fragilitas (Fragility Curves) Bangunan Eksisting

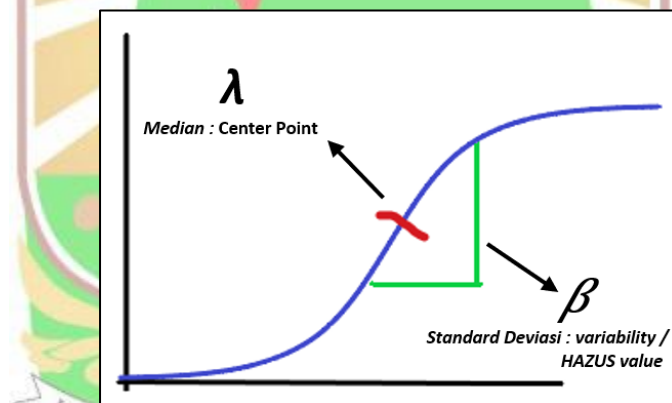
Persamaan Kurva Fragilitas dapat dinyatakan dengan :

$$P(D_s/S_d) = \phi\left(\frac{L_n(S_d) - L_n(\lambda)}{\beta}\right) \quad \text{Persamaan 10}$$

Dimana :

ϕ = Fungsi Distribusi Kumulatif Normal Standar
 L_n = Logaritma Natural
 S_d = Spectral displacement
 λ = Titik Median
 β = Standar Deviasi

Didalam plot kurva fragilitas, terdapat nilai median (λ) yang merupakan titik tengah / *center point* dan standar deviasi (β) yang merupakan nilai *Variability* / HAZUS value.

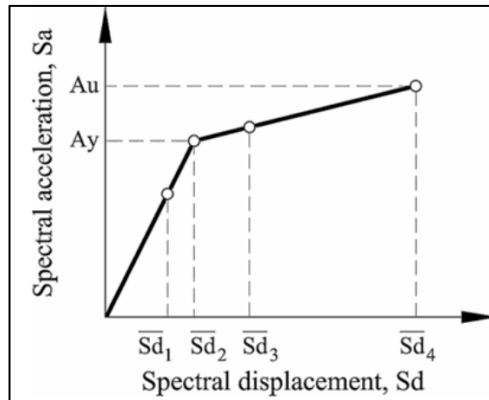


Gambar 4.65 Plot Kurva Fragilitas

Sumber : (Fras Setyo, 2025)

4.3.1 Menghitung Nilai Median (λ) dari Pushover Analysis Bangunan Eksisting

Untuk menghitung nilai median fragilitas dapat menggunakan persamaan untuk 4 kondisi *damage state* berikut, yang mana nilai nya dapat diperoleh dari kurva pushover yang telah diubah kedalam bentuk *bi-linear*.



Gambar 4.66 Kurva Spektrum Kapasitas Bi-linear

Sumber : (Barbat et al., 2008)

Tabel 4.61 Ambang batas kondisi kerusakan didefinisikan sesuai dengan spektrum kapasitas

No.	Displacement (%)	Median Spectral displacement, S_d	Damage State Thresold
1	$0.7 D_y$	S_{d1}	Slight
2	D_y	S_{d2}	Moderate
3	$D_y + 0.25(D_u - D_y)$	S_{d3}	Extensive
4	D_u	S_{d4}	Collapse

Dimana :

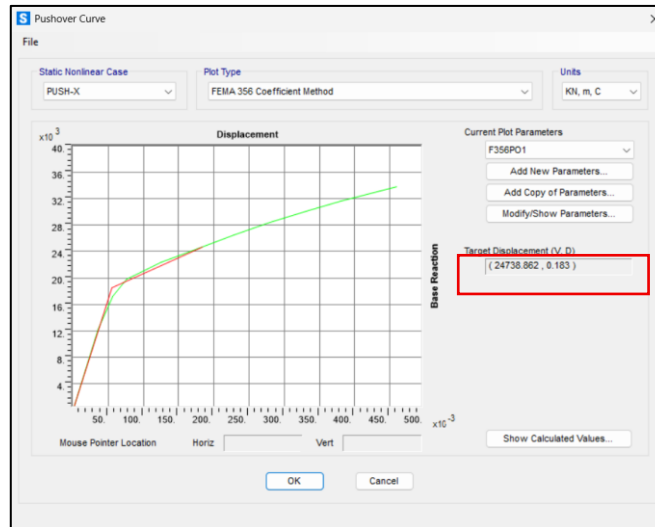
D_y = Displacement Yield/Perpindahan Leleh

D_u = Displacement Ultimate/Perpindahan Akhir

Sumber : HAZUS 2003

a. Median untuk pushover curve – X

Berikut adalah hasil kurva kapasitas dengan plot type FEMA 356 untuk pushover curve – X.



Gambar 4.67 Kurva PUSH-X dengan plot type FEMA 356 – Bangunan Eksisting

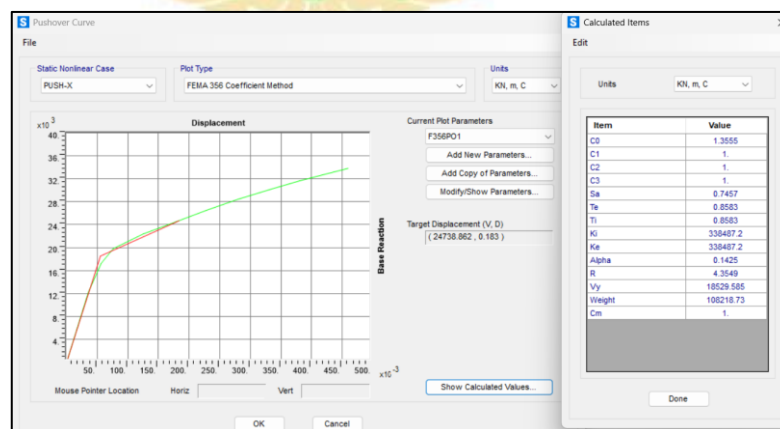
Dari hasil pushover yang diperoleh, maka dapat diperkirakan 2 (dua) nilai sebagai berikut :

1. *Roof displacement at yield* / pada titik leleh pertama (Δy)
2. *Roof displacement at ultimate* / pada titik leleh akhir (Δu)

Untuk nilai (Δu) langsung bisa diketahui dari *display* kurva pushover *bi-linear* diatas pada kolom *target displacement*.

$$\Delta u = 0,183$$

Untuk nilai (Δy) secara akurat dapat dilakukan dengan beberapa parameter yaitu dengan mengetahui nilai K_i (Kekakuan garis ke-1 / segmen 1) dari hasil *calculated items* pada kurva pushover *bi-linear*.



Gambar 4.68 Calculated Items PUSH-X – Bangunan Eksisting

$$Ki = 338487.2$$

$$Vy = 18529.58$$

$$k = \frac{Vy}{\Delta y}$$

Persamaan 11

$$\Delta y = \frac{Vy}{Ki}$$

Persamaan 12

$$\Delta y = \frac{Vy}{Ki} = \frac{18529,58}{338487,2} = 0,054742 \text{ m}$$

Maka nilai $\Delta y = 0,054742 \text{ m}$

Sehingga,

$$\text{Roof displacement at yield } (\Delta y) = 0,055 \text{ m}$$

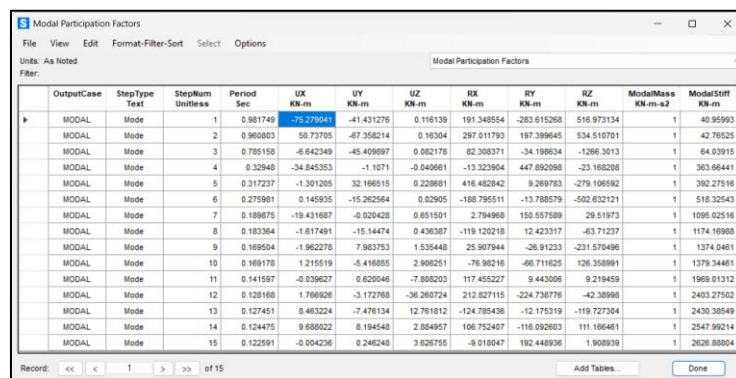
$$\text{Roof displacement at Ultimate } (\Delta u) = 0,183 \text{ m}$$

Setelah mendapatkan nilai *Roof Displacement at Yield* (Δy) dan *Roof Displacement at Ultimate* (Δu), selanjutnya mengubahnya menjadi perpindahan spektral dengan persamaan sebagai berikut.

$$Dy = \frac{\Delta y}{Ux1 \times U1}$$

$$Du = \frac{\Delta u}{Ux1 \times U1}$$

Untuk menghitung nilai *1st mode partication factor* bisa dilihat dari *show table – structure output – modal participation factors*. Pada mode 1, ambil data UX (untuk arah X)

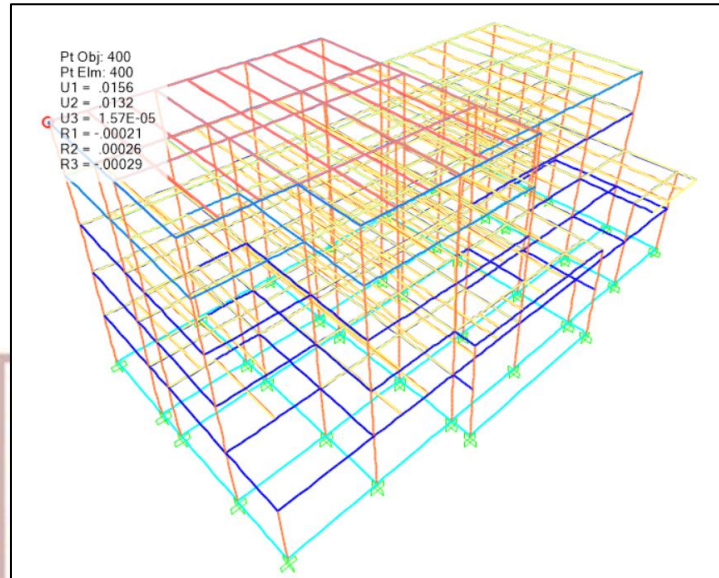


OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ	ModalMass	ModalStiff
	Text	Unitless	Sec	KN-m	KN-m	KN-m	KN-m	KN-m	KN-m	KN-m-s2	KN-m
MODAL	Mode	1	0.981749	-75.279541	-41.431276	0.116139	191.348554	-283.615268	516.973134	1	40.95993
MODAL	Mode	2	0.960803	50.73705	-67.358214	0.16304	297.011793	197.399645	534.510701	1	42.76525
MODAL	Mode	3	0.785158	-6.642349	-45.409897	0.082178	82.308371	-34.198634	-1266.3013	1	64.03915
MODAL	Mode	4	0.32948	-34.845353	-1.1071	-0.040661	-13.323904	447.892098	-23.168208	1	363.66441
MODAL	Mode	5	0.317237	-1.301205	32.166515	0.228681	416.482842	9.269783	-279.106592	1	392.27516
MODAL	Mode	6	0.275981	0.145935	-15.262564	0.02905	-188.795511	-13.788579	-502.632121	1	510.32543
MODAL	Mode	7	0.189875	-19.431687	-0.020428	0.651501	2.794968	150.557589	29.51973	1	1095.02516
MODAL	Mode	8	0.183364	-1.617491	-15.14474	0.436387	-119.120218	12.423317	-63.71237	1	1174.16988
MODAL	Mode	9	0.169504	-1.982278	7.983753	1.535448	25.907944	-26.91233	-231.570496	1	1374.0461
MODAL	Mode	10	0.169178	1.215519	-5.416855	2.908251	-76.98216	-66.711625	126.358991	1	1379.34461
MODAL	Mode	11	0.141597	-0.039627	0.620048	-7.808203	117.455227	9.443006	9.219459	1	1969.01312
MODAL	Mode	12	0.128168	1.769826	-3.172768	-36.260724	212.627115	-224.738776	-42.38998	1	2430.27502
MODAL	Mode	13	0.127451	8.463224	-7.476134	12.761812	-124.785436	-12.175319	-119.727304	1	2430.38549
MODAL	Mode	14	0.124475	9.688022	8.194548	2.884957	106.752407	-116.092803	111.166461	1	2547.99214
MODAL	Mode	15	0.122591	-0.004236	0.246248	3.626755	-9.018047	192.448936	1.908939	1	2626.88004

Gambar 4.69 Structure Output Modal Partipation Factors Arah-X (Bangunan Eksiting)

Dari **Gambar 4.69** didapatkan: $U_{x1} = 75,27$

Untuk nilai **1 st mode modal displacement at roof** dapat dilihat pada deformed shape mode ke 1, ambil **U1** untuk arah X



Gambar 4.70 Mode Modal Displacement at Roof – Bangunan Eksisting

Dari **Gambar 4.70** didapatkan: $U1 = 0,0156$

Maka, kontrol nilai yang didapatkan dan juga perhitungannya adalah sebagai berikut.

$$\Delta y = 0,055 \text{ m}$$

$$\Delta u = 0,183 \text{ m}$$

$$U_{x1} = 75,27$$

$$U1 = 0,0156$$

$$Dy = \frac{\Delta y}{U_{x1} \times U1} = \frac{0,055}{75,27 \times 0,0156} = 0,046620 \text{ m}$$

$$Du = \frac{\Delta u}{U_{x1} \times U1} = \frac{0,183}{75,27 \times 0,0156} = 0,15584 \text{ m}$$

Setelah didapatkan nilai **Roof Displacement at Yield (Δy)** dan **Roof Displacement at Ultimate (Δu)**, maka dimasukkan ke persamaan median untuk berbagai kondisi *damage state*

1) Kondisi Sligh Damage

$$\begin{aligned} \text{Median} &= 0.7 D_y \\ &= 0,7 \times 0,04662 \\ &= \mathbf{0,032634} \end{aligned}$$

2) Kondisi Moderate Damage

$$\begin{aligned} \text{Median} &= D_y \\ &= \mathbf{0,046620} \end{aligned}$$

3) Kondisi Extensive Damage

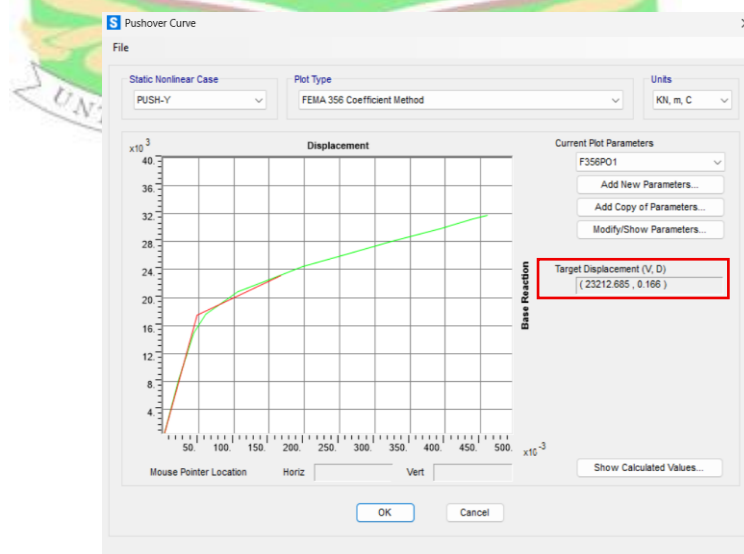
$$\begin{aligned} \text{Median} &= D_y + 0.25(D_u - D_y) \\ &= 0,04662 + 0,25 \times (0,15584 - 0,04662) \\ &= \mathbf{0,073928} \end{aligned}$$

4) Kondisi Collapse Damage

$$\begin{aligned} \text{Median} &= D_u \\ &= \mathbf{0,155849} \end{aligned}$$

b. Median untuk pushover curve – y

Berikut adalah hasil kurva kapasitas dengan plot type FEMA 356 untuk pushover curve – Y.



Gambar 4.71 Kurva PUSH-Y dengan plot type FEMA 356 – Bangunan Eksisting

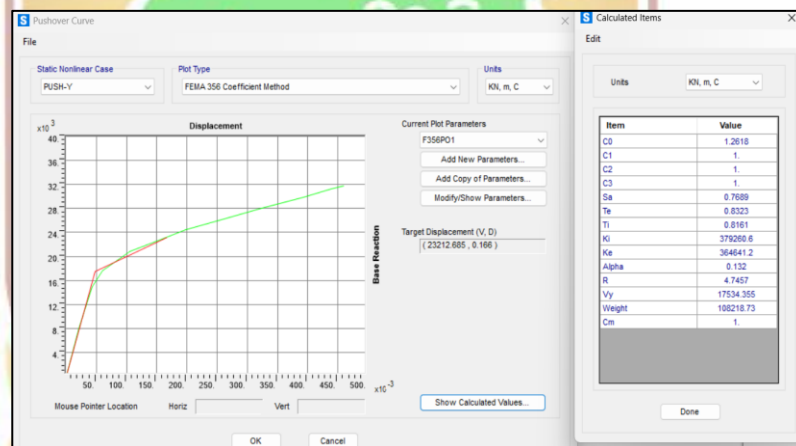
Dari hasil pushover yang diperoleh, maka dapat diperkirakan 2 (dua) nilai sebagai berikut :

1. *Roof displacement at yield* / pada titik leleh pertama (Δy)
2. *Roof displacement at ultimate* / pada titik leleh akhir (Δu)

Untuk nilai (Δu) langsung bisa diketahui dari display kurva pushover *bi-linear* diatas pada kolom *target displacement*.

$$\Delta u = 0,166$$

Untuk nilai (Δy) secara akurat dapat dilakukan dengan beberapa parameter yaitu dengan mengetahui nilai K_i (Kekakuan garis ke-1 / segmen 1) dari hasil *calculated items* pada kurva pushover *bi-linear*.



Gambar 4.72 Calculated Items PUSH-Y- Bangunan Eksisting

$$K_i = 379260.6$$

$$V_y = 17534,35$$

$$k = \frac{V_y}{\Delta y}$$

$$\Delta y = \frac{V_y}{K_i} = \frac{17534,35}{379260,6} = 0,046 \text{ m}$$

Maka nilai $\Delta y = 0,046 \text{ m}$

Sehingga,

$$\text{Roof displacement at yield } (\Delta y) = 0,046 \text{ m}$$

$$\text{Roof displacement at Ultimate } (\Delta u) = 0,166 \text{ m}$$

Setelah mendapatkan nilai *Roof Displacement at Yield* (Δy) dan *Roof Displacement at Ultimate* (Δu), selanjutnya mengubahnya menjadi perpindahan spektral dengan persamaan sebagai berikut.

$$Dy = \frac{\Delta y}{Uy1 \times U2}$$

$$Du = \frac{\Delta u}{Uy1 \times U2}$$

Untuk menghitung nilai *1st mode partication factor* bisa dilihat dari *show table – structure output – modal participation factors*. Pada mode 1, ambil data UX (untuk arah X)

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ	ModalMass	ModalStiff
	Text	Unitless	Sec	KN-m	KN-m	KN-m	KN-m	KN-m	KN-m	KN-m-s2	KN-m
MODAL	Mode	1	0.981749	-75.279041	-41.431278	0.118139	191.348554	-283.615268	516.973134	1	40.95993
MODAL	Mode	2	0.960803	50.73705	-67.358214	0.18304	297.011793	197.399645	534.510701	1	42.78525
MODAL	Mode	3	0.785158	-6.642349	-45.409897	0.082178	82.308371	-34.198634	-1268.3013	1	64.03915
MODAL	Mode	4	0.32948	-34.845353	-1.1071	-0.040661	-13.323904	447.892096	-23.168206	1	363.66441
MODAL	Mode	5	0.317237	-1.301205	32.166515	0.229681	416.482842	9.269783	-279.165592	1	392.27518
MODAL	Mode	6	0.275981	0.145935	-15.262564	0.02905	-188.795511	-13.788579	-582.632121	1	518.32543
MODAL	Mode	7	0.189875	-19.431687	-0.029438	0.051501	2.794968	150.557589	29.51973	1	1095.02516
MODAL	Mode	8	0.183364	-1.617491	-15.14474	0.436387	-119.120218	12.423317	-83.71237	1	1174.16988
MODAL	Mode	9	0.189504	-1.962278	7.983753	1.535448	25.907944	-26.91233	-231.570496	1	1374.0461
MODAL	Mode	10	0.169178	1.215519	-5.416855	2.906251	-76.98216	-66.711625	126.358991	1	1379.34461
MODAL	Mode	11	0.141597	-0.039627	0.620046	-7.808203	117.455227	9.443006	9.219459	1	1969.01312
MODAL	Mode	12	0.128168	1.766926	-3.172768	-36.280724	212.827115	-224.738776	-42.38996	1	2403.27502
MODAL	Mode	13	0.127451	8.463224	-7.478134	12.781812	-124.785436	-12.175319	-119.727304	1	2430.38549
MODAL	Mode	14	0.124475	9.608022	8.194548	2.884957	106.752407	-116.092803	111.166461	1	2547.99214
MODAL	Mode	15	0.122591	-0.004236	0.246248	3.626755	-9.018047	192.448936	1.908939	1	2626.88084

Gambar 4.73 Structure Output Modal Partipation Factors Arah-Y (Bangunan Eksisting)

Dari Gambar 4.73 didapatkan: $Uy1 = 67.36$

Untuk nilai *1 st mode modal displacement at roof* dapat dilihat pada *deformed shape mode* ke 1, ambil $U1$ untuk arah X

Dari Gambar 4.70 didapatkan: $U2 = 0,0132$

Maka, kontrol nilai yang didapatkan dan juga perhitungannya adalah sebagai berikut.

$$\Delta y = 0,046 \text{ m}$$

$$\Delta u = 0,166 \text{ m}$$

$$Uy1 = 67.36$$

$$U2 = 0,0132$$

$$D_y = \frac{\Delta y}{U_{y1} \times U_2} = \frac{0,046}{67.36 \times 0,0132} = \mathbf{0,051997 \text{ m}}$$

$$D_u = \frac{\Delta u}{U_{y1} \times U_2} = \frac{0,166}{67.36 \times 0,0132} = \mathbf{0,186695 \text{ m}}$$

Setelah didapatkan nilai *Roof Displacement at Yield* (Δy) dan *Roof Displacement at Ultimate* (Δu), maka dimasukkan ke persamaan median untuk berbagai kondisi *damage state*

- 1) Kondisi Sligh Damage

$$Median = 0.7 D_y$$

$$= 0,7 \times 0,051997$$

$$Median = \mathbf{0,036398}$$

- 2) Kondisi Moderate Damage

$$Median = D_y$$

$$Median = \mathbf{0,051997}$$

- 3) Kondisi Extensive Damage

$$Median = D_y + 0.25(D_u - D_y)$$

$$Median = 0,051997 + 0,25 \times (0,186695 - 0,051997)$$

$$Median = \mathbf{0,085671}$$

- 4) Kondisi Collapse Damage

$$Median = D_u$$

$$= \mathbf{0,186695}$$

4.3.2 Menghitung Nilai Standar Deviasi (β) – Bangunan Eksisting

Nilai standar deviasi (β) atau *Variability HAZUS Value* digunakan untuk menggambarkan penyebaran atau ketidakpastian respons struktur pada tiap tingkat kerusakan (*damage state*). Penentuan nilai (β) diperlukan untuk membentuk kurva fragilitas bangunan eksisting, karena parameter ini mempengaruhi bentuk fungsi peluang kerusakan akibat beban gempa.

Pada bangunan eksisting dalam penelitian ini, karakteristik struktur mengacu pada klasifikasi C1M berdasarkan HAZUS, yaitu kategori gedung beton bertulang berperilaku dengan tinggi menengah tanpa perkuatan tambahan. Oleh karena itu, nilai (β) diambil dari tabel *HAZUS Manual* versi terbaru (HAZUS 4.2 SP3, 2020), tepatnya pada parameter *spectral displacement* untuk tipe bangunan C1M. (**Gambar. 2. 11**)

Nilai (β) tersedia untuk empat tingkat kerusakan *Slight*, *Moderate*, *Extensive*, dan *Collapse*. Karena HAZUS menggunakan satuan *inchi*, seluruh nilai (β) dikonversi ke satuan *meters* dengan menggunakan faktor perkalian 0,0254 agar konsisten dengan satuan analisis dalam penelitian. Nilai (β) hasil konversi ini kemudian digunakan sebagai parameter standar deviasi pada kurva fragilitas bangunan eksisting.

Tabel 4.62 HAZUS Value untuk bangunan eksisting

Damage State	HAZUS Value (Inches)	Konversi HAZUZ Value (Meter)
Slight	0.68	0.017272
Moderate	0.67	0.017018
Extensive	0.68	0.017272
Collapse	0.81	0.020574

4.3.3 Kontrol Nilai Median (λ) dan Standar Deviasi (β) Bangunan Eksisting

Tabel 4.63 Kontrol nilai Median (λ) dan Standar Deviasi (β) Bangunan Eksisting

Damage State	Median (λ) arah - X	Median (λ) arah - Y	Standard Deviation (β)	
			HAZUS Value (Inches)	Konversi HAZUZ Value (Meter)
Slight	0,032634	0.036398	0.68	0.017272
Moderate	0,046620	0.051997	0.67	0.017018
Extensive	0,073928	0.085671	0.68	0.017272
Collapse	0,155849	0.186695	0.81	0.020574

4.3.4 Analisis Kurva Fragilitas (*Fragility Curve*) bangunan Retrofitting

Pada bagian ini dilakukan analisis kurva fragilitas untuk bangunan setelah diberikan tindakan *retrofitting* . Analisis ini bertujuan untuk mengetahui perubahan probabilitas kerusakan bangunan setelah dilakukan perkuatan, serta mengevaluasi peningkatan performa struktur dibandingkan dengan kondisi eksisting.

Metode perhitungan kurva fragilitas pada bangunan *retrofitting* dilakukan dengan pendekatan yang sama seperti pada bangunan eksisting, yaitu menggunakan nilai median *spectral displacement* dan *standard deviation* yang diperoleh dari kurva pushover hasil pemodelan bangunan *retrofitting*.

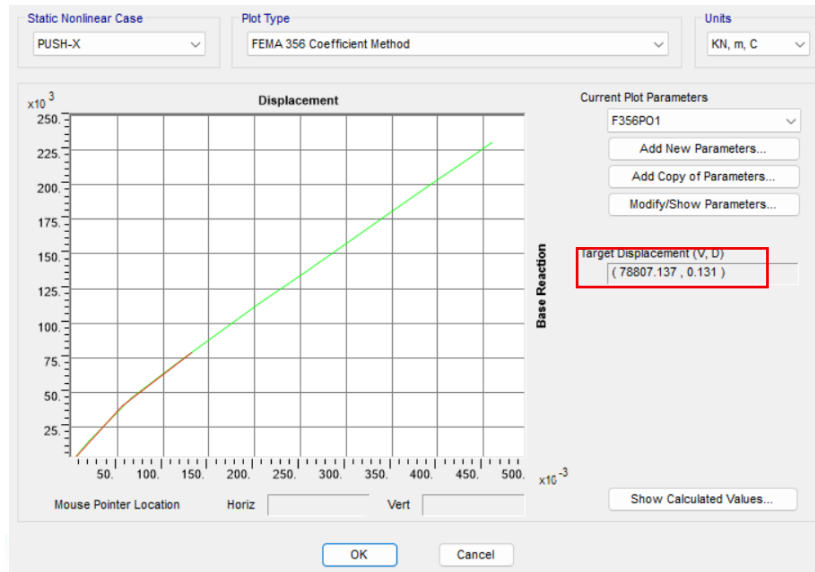
4.3.5 Menghitung Nilai Median (λ) dari Pushover Analysis – Bangunan Retrofitting

Perhitungan nilai median fragilitas untuk bangunan *retrofitting* dilakukan menggunakan kurva pushover hasil analisis struktur yang telah diberi perkuatan. Nilai median untuk setiap *damage state* diperoleh berdasarkan parameter perpindahan leleh (D_y) dan perpindahan ultimit (D_u) dari kurva kapasitas *bi-linear* bangunan *retrofitting*.

Proses perhitungan median (λ) pada bangunan *retrofitting* ini menggunakan rumus dan batasan *damage state* yang sama seperti yang digunakan pada kondisi eksisting, sehingga hasil *fragility curve* dapat dibandingkan secara langsung antara dua kondisi struktur.

a. Median untuk *pushover curve* – X

Berikut adalah hasil kurva kapasitas dengan *plot type* FEMA 356 untuk *pushover curve* – X.



**Gambar 4.74 Kurva PUSH-X dengan plot type FEMA 356 –
Bangunan Retrofitting**

Dari hasil pushover yang diperoleh, maka dapat diperkirakan 2 (dua) nilai sebagai berikut :

1. *Roof displacement at yield* / pada titik leleh pertama (Δy)
2. *Roof displacement at ultimate* / pada titik leleh akhir (Δu)

Untuk nilai (Δu) langsung bisa diketahui dari *display* kurva pushover *bi-linear* diatas pada kolom *target displacement*.

$$\Delta u = 0,131$$

Untuk nilai (Δy) secara akurat dapat dilakukan dengan beberapa parameter yaitu dengan mengetahui nilai K_i (Kekakuan garis ke-1 / segmen 1) dari hasil *calculated items* pada kurva pushover *bi-linear*.

$$K_i = 782985,4$$

$$V_y = 40539,34$$

$$k = \frac{V_y}{\Delta y}$$

$$\Delta y = \frac{V_y}{K_i} = \frac{40539,34}{782985,4} = 0,0518 \text{ m}$$

Maka nilai $\Delta y = 0,0518 \text{ m}$

Sehingga,

$$\text{Roof displacement at yield } (\Delta y) = 0,0518 \text{ m}$$

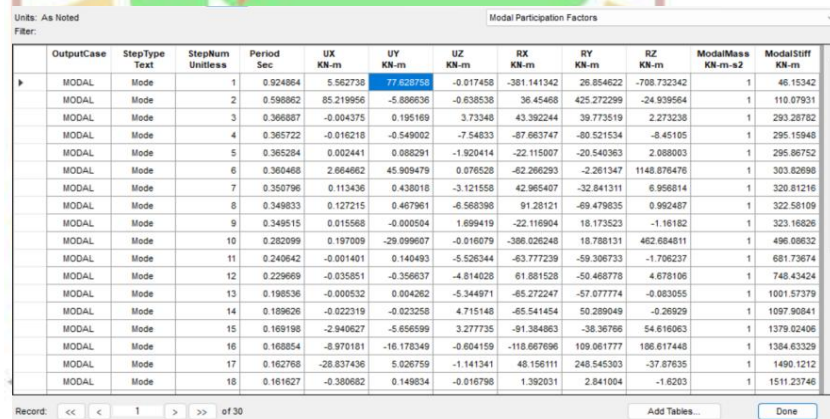
$$\text{Roof displacement at Ultimate } (\Delta u) = 0,131 \text{ m}$$

Setelah mendapatkan nilai *Roof Displacement at Yield* (Δy) dan *Roof Displacement at Ultimate* (Δu), selanjutnya mengubahnya menjadi perpindahan spektral dengan persamaan sebagai berikut.

$$Dy = \frac{\Delta y}{Ux1 \times U1}$$

$$Du = \frac{\Delta u}{Ux1 \times U1}$$

Untuk menghitung nilai *1st mode partication factor* bisa dilihat dari *show table – structure output – modal participation factors*. Pada mode 1, ambil data UX (untuk arah X)

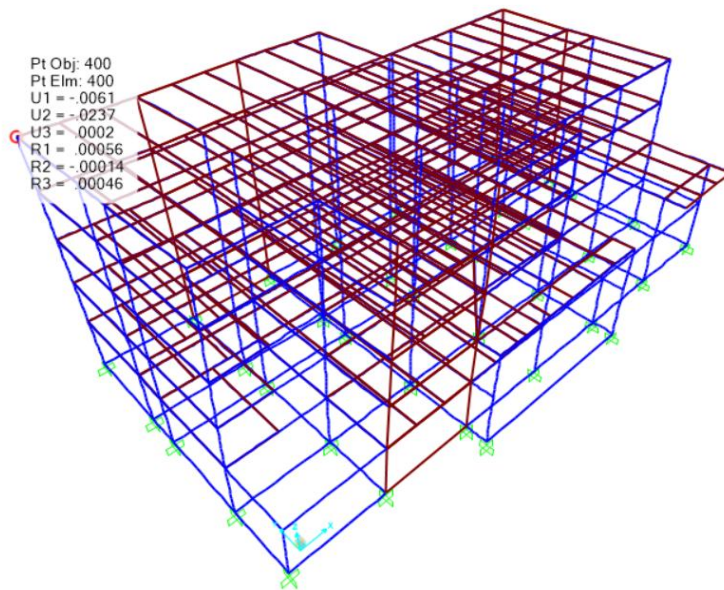


	OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ	ModalMass	ModalStiff
		Text	Unitless	Sec	KN-m	KN-m	KN-m	KN-m	KN-m	KN-m	KN-m-s2	KN-m
▶	MODAL	Mode	1	0.924864	5.562738	77.628758	-0.017458	-381.141342	26.054622	-708.732342	1	46.15342
	MODAL	Mode	2	0.598862	85.219956	-5.886636	-0.638538	36.45468	425.272299	-24.939564	1	110.07931
	MODAL	Mode	3	0.368687	-0.004375	0.195169	3.73348	43.392244	39.773519	2.273238	1	293.28782
	MODAL	Mode	4	0.365722	-0.016218	-0.549002	-7.54833	-87.663747	-80.521534	-8.45105	1	295.15948
	MODAL	Mode	5	0.365284	0.002441	0.088291	-1.920414	-22.115007	-20.540363	2.088003	1	295.86752
	MODAL	Mode	6	0.360468	2.664662	45.909479	0.078528	-82.266293	-2.261347	1148.676476	1	303.82698
	MODAL	Mode	7	0.350796	0.113436	0.438018	-3.121558	42.965407	-32.841311	6.956814	1	320.81216
	MODAL	Mode	8	0.349833	0.127215	0.467961	-6.568398	91.28121	-89.479635	0.992487	1	322.58109
	MODAL	Mode	9	0.349515	0.015568	-0.000504	1.699419	-22.116904	18.173523	-1.16182	1	323.16626
	MODAL	Mode	10	0.282099	0.197009	-29.099607	-0.016079	-386.026248	18.788131	462.684811	1	496.08632
	MODAL	Mode	11	0.240642	-0.001401	0.140493	-5.526344	-63.777239	-59.306733	-1.706237	1	681.73674
	MODAL	Mode	12	0.229669	-0.035851	-0.356637	-4.814028	61.881528	-50.468778	4.678106	1	748.43424
	MODAL	Mode	13	0.198536	-0.000532	0.004282	-5.344971	-65.272247	-57.077774	-0.083055	1	1001.57379
	MODAL	Mode	14	0.189626	-0.022319	-0.023258	4.715148	-65.541454	50.289049	-0.28629	1	1097.90841
	MODAL	Mode	15	0.169198	-2.940627	-5.656599	3.277735	-91.384863	-38.36766	54.616063	1	1379.02406
	MODAL	Mode	16	0.168854	-8.970181	-16.178349	-0.604159	-118.667696	109.061777	186.617448	1	1384.63329
	MODAL	Mode	17	0.162768	-28.837436	5.026759	-1.141341	48.156111	248.545303	-37.87635	1	1490.1212
	MODAL	Mode	18	0.161627	-0.380682	0.149634	-0.016798	1.392031	2.841004	-1.6203	1	1511.23746

Gambar 4.75 Structure Output Modal Partipation Factors Arah-X – Bangunan Retrofitting

$$Ux1 = 85,21$$

Untuk nilai *1 st mode modal displacement at roof* dapat dilihat pada *deformed shape mode* ke 1, ambil **U1** untuk arah X



Gambar 4.76 Mode Modal Displacement at Roof – Bangunan Retrofitting

$$U1 = 0,0061$$

Maka, kontrol nilai yang didapatkan dan juga perhitungannya adalah sebagai berikut.

$$\Delta y = 0,0518 \text{ m}$$

$$\Delta u = 0,131 \text{ m}$$

$$Ux1 = 85,21$$

$$U1 = 0,0061$$

$$Dy = \frac{\Delta y}{Ux1 \times U1} = \frac{0,0518}{85,21 \times 0,0061} = 0,099610 \text{ m}$$

$$Du = \frac{\Delta u}{Ux1 \times U1} = \frac{0,131}{85,21 \times 0,0061} = 0,252029 \text{ m}$$

Setelah didapatkan nilai *Roof Displacement at Yield* (Δy) dan *Roof Displacement at Ultimate* (Δu), maka dimasukkan ke persamaan median untuk berbagai kondisi *damage state*

1) Kondisi Sligh Damage

$$\begin{aligned} \text{Median} &= 0.7 D_y \\ &= 0,7 \times 0,099610 \\ &= \mathbf{0.069727} \end{aligned}$$

2) Kondisi Moderate Damage

$$\begin{aligned} \text{Median} &= D_y \\ &= \mathbf{0,099610} \end{aligned}$$

3) Kondisi Extensive Damage

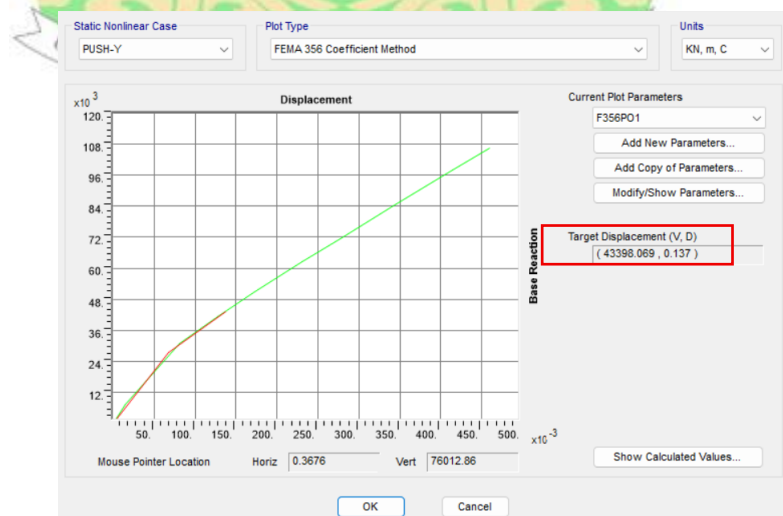
$$\begin{aligned} \text{Median} &= D_y + 0.25(D_u - D_y) \\ \text{Median} &= 0,099610 + 0,25 \times (0,252029 - 0,099610) \\ \text{Median} &= \mathbf{0.137715} \end{aligned}$$

4) Kondisi Collapse Damage

$$\begin{aligned} \text{Median} &= D_u \\ \text{Median} &= \mathbf{0,252029} \end{aligned}$$

b. Median untuk *pushover curve* – y

Berikut adalah hasil kurva kapasitas dengan *plot type* FEMA 356 untuk *pushover curve* – Y.



Gambar 4.77 Kurva *PUSH-Y* dengan *plot type* FEMA 356 Bangunan Retrofitting

Dari hasil pushover yang diperoleh, maka dapat diperkirakan 2 (dua) nilai sebagai berikut :

1. *Roof displacement at yield* / pada titik leleh pertama (Δy)
2. *Roof displacement at ultimate* / pada titik leleh akhir (Δu)

Untuk nilai (Δu) langsung bisa diketahui dari *display* kurva pushover *bi-linear* diatas pada kolom *target displacement*.

$$\Delta u = 0,137$$

Untuk nilai (Δy) secara akurat dapat dilakukan dengan beberapa parameter yaitu dengan mengetahui nilai K_i (Kekakuan garis ke-1 / segmen 1) dari hasil *calculated items* pada kurva pushover *bi-linear*.

$$K_i = 496248,3$$

$$V_y = 27258,18$$

$$k = \frac{V_y}{\Delta y}$$

$$\Delta y = \frac{V_y}{K_i} = \frac{27258,18}{496248,3} = 0,055 \text{ m}$$

Maka nilai $\Delta y = 0,055 \text{ m}$

Sehingga,

$$\text{Roof displacement at yield } (\Delta y) = 0,055 \text{ m}$$

$$\text{Roof displacement at Ultimate } (\Delta u) = 0,137 \text{ m}$$

Setelah mendapatkan nilai *Roof Displacement at Yield* (Δy) dan *Roof Displacement at Ultimate* (Δu), selanjutnya mengubahnya menjadi perpindahan spektral dengan persamaan sebagai berikut.

$$Dy = \frac{\Delta y}{Uy1 \times U2}$$

$$Du = \frac{\Delta u}{Uy1 \times U2}$$

Untuk menghitung nilai *1st mode particaton factor* bisa dilihat dari *show table – structure output – modal participation factors*. Pada mode 1, ambil data **UX** (untuk arah X).

Units: As Noted
Filter: Modal Participation Factors

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ	ModalMass	ModalStiff
	Text	Unitless	Sec	KN-m	KN-m	KN-m	KN-m	KN-m	KN-m	KN-m-s2	KN-m
MODAL	Mode	1	0.924864	5.562738	77.620758	-0.017458	-381.141342	26.854622	-708.732342	1	46.15342
MODAL	Mode	2	0.598862	85.219956	-5.886636	-0.638536	36.45468	425.272299	-24.939564	1	110.07931
MODAL	Mode	3	0.366887	-0.004375	0.195169	3.73348	43.392244	39.773519	2.273238	1	293.28782
MODAL	Mode	4	0.365722	-0.016218	-0.548002	-7.54833	-87.663747	-80.521534	-8.45105	1	295.15948
MODAL	Mode	5	0.365284	0.002441	0.088291	-1.920414	-22.115007	-20.540363	2.088003	1	295.86752
MODAL	Mode	6	0.360468	2.664662	45.909479	0.076528	-62.266293	-2.261347	1148.876476	1	303.62698
MODAL	Mode	7	0.350796	0.113436	0.438018	-3.121558	42.965407	-32.841311	6.956814	1	320.81216
MODAL	Mode	8	0.349833	0.127215	0.467961	-6.568396	91.28121	-69.479835	0.992487	1	322.58109
MODAL	Mode	9	0.349515	0.015568	-0.000504	1.699419	-22.116904	18.173523	-1.16182	1	323.16826
MODAL	Mode	10	0.282099	0.197009	-29.099607	-0.016079	-386.026248	18.788131	462.684811	1	496.08632
MODAL	Mode	11	0.240642	-0.001401	0.140493	-5.526344	-63.777239	-59.306733	-1.706237	1	681.73674
MODAL	Mode	12	0.229669	-0.035051	-0.356637	-4.814028	61.881528	-50.468778	4.678106	1	748.43424
MODAL	Mode	13	0.198536	-0.000532	0.004262	-5.344971	-65.272247	-57.077774	-0.083055	1	1001.57379
MODAL	Mode	14	0.189626	-0.022319	-0.023258	4.715148	-65.541454	50.289049	-0.26929	1	1097.90841
MODAL	Mode	15	0.169198	-2.940627	-5.656599	3.277735	-91.384863	-38.36766	54.616063	1	1379.02406
MODAL	Mode	16	0.168854	-8.970181	-16.178349	-0.604159	-110.667696	109.061777	186.617448	1	1384.63329
MODAL	Mode	17	0.162768	-28.837436	5.026759	-1.141341	48.156111	248.545303	-37.87635	1	1490.1212
MODAL	Mode	18	0.161627	-0.380682	0.149834	-0.016796	1.392031	2.841004	-1.6203	1	1511.23746

Record: << < 1 > >> of 30
Add Tables... Done

Gambar 4.78 Structure Output Modal Partipation Factors Arah-Y – Bangunan Retrofitting

$$U_{y1} = 77,62$$

Untuk nilai 1 st mode modal displacement at roof dapat dilihat pada deformed shape mode ke 1, ambil U1 untuk arah X

Dari **Gambar 4.76** didapatkan: $U_2 = 0,0202$

Maka, kontrol nilai yang didapatkan dan juga perhitungannya adalah sebagai berikut.

$$\Delta y = 0,055 \text{ m}$$

$$\Delta u = 0,137 \text{ m}$$

$$U_{y1} = 77,62$$

$$U_2 = 0,0237$$

$$D_y = \frac{\Delta y}{U_{y1} \times U_2} = \frac{0,055}{77,62 \times 0,0237} = 0,029559 \text{ m}$$

$$D_u = \frac{\Delta u}{U_{y1} \times U_2} = \frac{0,137}{77,62 \times 0,0237} = 0,074473 \text{ m}$$

Setelah didapatkan nilai *Roof Displacement at Yield* (Δy) dan *Roof Displacement at Ultimate* (Δu), maka dimasukkan ke persamaan median untuk berbagai kondisi *damage state*.

1) Kondisi Sligh Damage

$$\begin{aligned} \text{Median} &= 0.7 D_y \\ &= 0,7 \times 0,029559 \\ &= \mathbf{0,020901} \end{aligned}$$

2) Kondisi Moderate Damage

$$\begin{aligned} \text{Median} &= D_y \\ &= \mathbf{0,029559} \end{aligned}$$

3) Kondisi Extensive Damage

$$\begin{aligned} \text{Median} &= D_y + 0.25(D_u - D_y) \\ \text{Median} &= 0,029559 + 0,25 \times (0,074473 - 0,029559) \\ \text{Median} &= \mathbf{0,041013} \end{aligned}$$

4) Kondisi Collapse Damage

$$\begin{aligned} \text{Median} &= D_u \\ \text{Median} &= \mathbf{0,074473} \end{aligned}$$

4.3.6 Menghitung Nilai Standar Deviasi (β)

Berdasarkan klasifikasi struktur dalam HAZUS (HAZUS 4.2 SP3, 2020), bangunan hasil perkuatan pada penelitian ini sesuai dengan tipe C2M, yaitu struktur dinding geser beton bertulang dengan tingkat menengah yang telah mengalami peningkatan performa melalui proses perkuatan.

Untuk menentukan nilai standar deviasi (β) atau *Variability HAZUS Value*, digunakan tabel *HAZUS Manual* pada parameter *spectral displacement* untuk tipe bangunan C2M. Nilai β ini diberikan untuk empat tingkat kerusakan (*damage state*): *Slight*, *Moderate*, *Extensive*, dan *Collapse*, yang mencerminkan tingkat ketidakpastian respons struktur pada tiap tahap kerusakan.

Karena tabel HAZUS menyajikan nilai β dalam satuan *inchi*, seluruh nilai tersebut dikonversikan terlebih dahulu ke dalam satuan *meters* dengan mengalikan faktor 0,0254. Nilai β hasil konversi ini kemudian digunakan dalam perhitungan kurva fragilitas bangunan *retrofitting*.

Tabel 4.64 HAZUS Value untuk bangunan retrofitting

Damage State	HAZUS Value (Inches)	Konversi HAZUZ Value (Meter)
Slight	0.74	0.018796
Moderate	0.77	0.019558
Extensive	0.68	0.017272
Collapse	0.77	0.019558

4.3.7 Kontrol Nilai Median (λ) dan Standar Deviasi (β) Bangunan Retrofitting

Tabel 4.65 Kontrol Nilai Median (λ) dan Standar Deviasi (β) Bangunan Retrofitting

Damage State	Median (λ) arah - X	Median (λ) arah - Y	Standard Deviation (β)	
			HAZUS Value (Inches)	Konversi HAZUZ Value (Meter)
Slight	0.069727	0.020901	0.74	0.018796
Moderate	0.099610	0.029859	0.77	0.019558
Extensive	0.137715	0.041013	0.68	0.017272
Collapse	0.252029	0.074473	0.77	0.019558

4.4 Perhitungan Kurva Fragilitas Bangunan Eksisting dan Bangunan Retrofitting

Kurva Kerapuhan (*Fragility Curves*) dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$P(D_s/S_d) = \phi\left(\frac{L_n(S_d) - L_n(\lambda)}{\beta}\right)$$

4.4.1 Fragility curve – X

a. Kondisi Slight Damage (SD)

1. Bangunan Eksisting

$$\text{Median } (\lambda) = 0,032634$$

$$\text{Standar Deviasi } (\beta) = 0,017272$$

Tabel 4.66 Kondisi Slight Damage (SD) Arah X – Bangunan Eksisting

Spectral Displ.	Ln(Sd)	Ln(λ)	Ln(Sd)-Ln(λ)	(Ln(Sd)-Ln(λ)) / β	Probability
0.029634	-3.51882	-3.422390	-0.096431	-5.583099	0.00
0.030634	-3.48563	-3.422390	-0.063244	-3.661620	0.0001
0.031634	-3.45351	-3.422390	-0.031122	-1.801868	0.0358
0.032634	-3.42239	-3.422390	0.0	0.0	0.5
0.033634	-3.39221	-3.422390	0.030182	1.747479	0.9597
0.034634	-3.36291	-3.422390	0.059481	3.443757	0.9997
0.035634	-3.33445	-3.422390	0.087945	5.091748	1.00

Untuk kondisi *slight damage* (SD) atau kerusakan ringan, jika *spectral displacement* 0,030634 m (3,16 cm) dengan probabilitas kerusakannya 4%, dan meningkat cepat probabilitas kerusakannya menjadi 50% disaat *spectral displacement* mencapai 0,032634 m (3,26 cm), dan probabilitas 100% saat *spectral displacement* nya 0,035634 m (3,56 cm).

2. Bangunan Retrofitting

$$\text{Median } (\lambda) = 0,069727$$

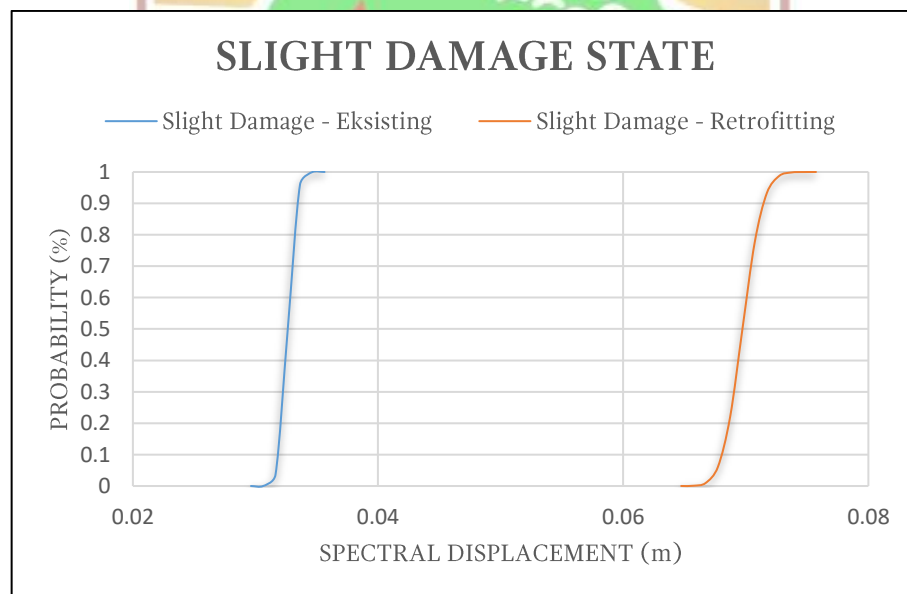
$$\text{Standar Deviasi } (\beta) = 0,018796$$

Tabel 4.67 Kondisi Slight Damage Arah X – Bangunan Retrofitting

Spectral Displ.	Ln(Sd)	Ln(λ)	Ln(Sd)-Ln(λ)	(Ln(Sd)-Ln(λ)) / β	Probability
0.064727	-2.73758	-2.663168	-0.074409	-3.958781	0.0000
0.065727	-2.72225	-2.663168	-0.059078	-3.143108	0.0008
0.066727	-2.70715	-2.663168	-0.043978	-2.339752	0.0096
0.067727	-2.69227	-2.663168	-0.029103	-1.548347	0.0608

0.068727	-2.67761	-2.663168	-0.014445	-0.768541	0.2211
0.069727	-2.66317	-2.663168	0	0	0.5
0.070727	-2.64893	-2.663168	0.014240	0.757597	0.7757
0.071727	-2.63489	-2.663168	0.028280	1.504557	0.9338
0.072727	-2.62104	-2.663168	0.042125	2.241175	0.9875
0.073727	-2.60739	-2.663168	0.055782	2.967733	0.9985
0.074727	-2.59391	-2.663168	0.069254	3.684502	0.9999
0.075727	-2.58062	-2.663168	0.082547	4.391744	1.0000

Untuk kondisi *slight damage* (SD) atau kerusakan ringan, jika *spectral displacement* 0,067727 m (6,7 cm) dengan probabilitas kerusakannya 6%, dan meningkat cepat probabilitas kerusakannya menjadi 50% disaat *spectral displacement* mencapai 0,069727m (6,97 cm), dan probabilitas 100% saat *spectral displacement* nya 0,075727m (7,57 cm).



Gambar 4.79 Kurva Fragilitas Slight Damage (SD) Arah X

b. Kondisi Moderate Damage (MD)

1. Bangunan Eksisting

$$\text{Median } (\lambda) = 0,046620$$

$$\text{Standar Deviasi } (\beta) = 0,017018$$

Tabel 4.68 Kondisi Moderate Damage (MD) Arah X – Bangunan Eksisting

Spectral Displ.	Ln(Sd)	Ln(λ)	Ln(Sd)-Ln(λ)	(Ln(Sd)-Ln(λ)) / β	Probability
0.043620	-3.13223	-3.065715	-0.066513	-3.908400	0.00
0.044620	-3.10956	-3.065715	-0.043847	-2.576506	0.0050
0.045620	-3.08740	-3.065715	-0.021683	-1.274133	0.1013
0.046620	-3.06572	-3.065715	0.0	0.0	0.5
0.047620	-3.04449	-3.065715	0.021223	1.247091	0.8938
0.048620	-3.02371	-3.065715	0.042005	2.468263	0.9932
0.049620	-3.00335	-3.065715	0.062364	3.664574	0.9999
0.050620	-2.98340	-3.065715	0.082316	4.837013	1.00

Untuk kondisi *moderate damage* (MD) atau kerusakan menengah, jika *spectral displacement* 0,045620 m (4,56 cm) maka probabilitas kerusakannya 10 % dan meningkat cepat probabilitasnya sampai 50 % ketika *spectral displacement* mencapai 0,046620 m (4,66 cm), dan probabilitasnya mencapai 100 % saat *spectral displacement* nya 0,050620 m (5,06 cm).

2. Bangunan Retrofitting

$$\text{Median } (\lambda) = 0,099610$$

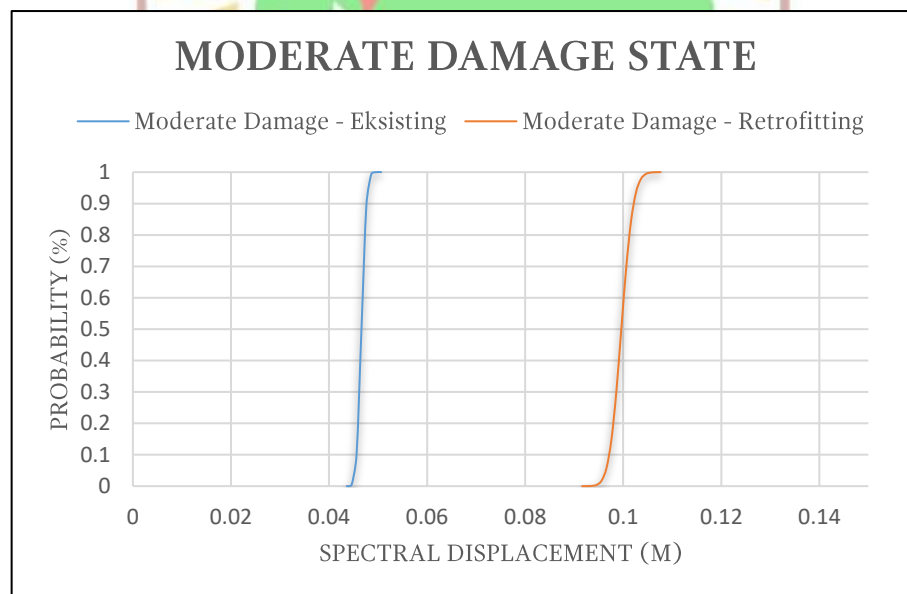
$$\text{Standar Deviasi } (\beta) = 0,019558$$

Tabel 4.69 Kondisi Moderate Damage (MD) Arah X – Bangunan Retrofitting

Spectral Displ.	Ln(Sd)	Ln(λ)	Ln(Sd)-Ln(λ)	(Ln(Sd)-Ln(λ)) / β	Probability
0.091610	-2.39022	-2.306493	-0.083722	-4.280713	0.0000
0.092610	-2.37936	-2.306493	-0.072865	-3.725611	0.0001
0.093610	-2.36862	-2.306493	-0.062125	-3.176470	0.0007
0.094610	-2.35799	-2.306493	-0.051499	-2.633164	0.0042
0.095610	-2.34748	-2.306493	-0.040985	-2.095571	0.0181
0.096610	-2.33707	-2.306493	-0.030580	-1.563571	0.0590
0.097610	-2.32678	-2.306493	-0.020283	-1.037050	0.1499
0.098610	-2.31658	-2.306493	-0.010090	-0.515896	0.3030

0.099610	-2.30649	-2.306493	0.0	0.0	0.5
0.100610	-2.29650	-2.306493	0.009989	0.510743	0.6952
0.101610	-2.28661	-2.306493	0.019879	1.016434	0.8453
0.102610	-2.27682	-2.306493	0.029673	1.517172	0.9354
0.103610	-2.26712	-2.306493	0.039371	2.013054	0.9779
0.104610	-2.25752	-2.306493	0.048977	2.504173	0.9939
0.105610	-2.24800	-2.306493	0.058491	2.990620	0.9986
0.106610	-2.23858	-2.306493	0.067915	3.472482	0.9997
0.107610	-2.22924	-2.306493	0.077251	3.949845	1.0000

Untuk kondisi *moderate damage (MD)* atau kerusakan menengah, jika *spectral displacement* 0.096610 m (9,66) cm maka probabilitas kerusakannya 6 % dan meningkat cepat probabilitasnya sampai 50 % ketika *spectral displacement* mencapai 0.099610 m (9,96) cm, dan probabilitasnya mencapai 100 % saat *spectral displacement* nya 0.107610 m (10,76 cm).



Gambar 4.80 Kurva Fragilitas Moderate Damage (MD) Arah X

c. Kondisi Extensive Damage (ED)

1. Bangunan Eksisting

$$\text{Median } (\lambda) = 0,073928$$

$$\text{Standar Deviasi } (\beta) = 0,017272$$

Tabel 4.70 Kondisi Extensive Damage (ED) Arah X – Bangunan Eksisting

Spectral Displ.	Ln(Sd)	Ln(λ)	Ln(Sd)-Ln(λ)	(Ln(Sd)-Ln(λ)) / β	Probability
0.068928	-2.67470	-2.604668	-0.070029	-4.054510	0.00
0.069928	-2.66029	-2.604668	-0.055626	-3.220575	0.0006
0.070928	-2.64609	-2.604668	-0.041427	-2.398481	0.0082
0.071928	-2.63209	-2.604668	-0.027426	-1.587897	0.0562
0.072928	-2.61829	-2.604668	-0.013619	-0.788505	0.2152
0.073928	-2.60467	-2.604668	0.0	0.0	0.5
0.074928	-2.59123	-2.604668	0.013436	0.777910	0.7817
0.075928	-2.57797	-2.604668	0.026694	1.545507	0.9389
0.076928	-2.56489	-2.604668	0.039778	2.303060	0.9894
0.077928	-2.55197	-2.604668	0.052694	3.050828	0.9989
0.078928	-2.53922	-2.604668	0.065445	3.789062	0.9999
0.079928	-2.52663	-2.604668	0.078035	4.518002	1.00

Untuk kondisi *extensive damage (ED)* atau kerusakan berat, jika *spectral displacement* 0.071928 m (7,19 cm) maka probabilitas kerusakannya 6 % dan meningkat cepat probabilitasnya sampai 50 % ketika *spectral displacement* mencapai 0.073928 m (7,39 cm), dan probabilitasnya mencapai 100% saat *spectral displacement* nya sebesar 0.079928 m (7,99 cm).

2. Bangunan Retrofitting

$$\text{Median } (\lambda) = 0,099610$$

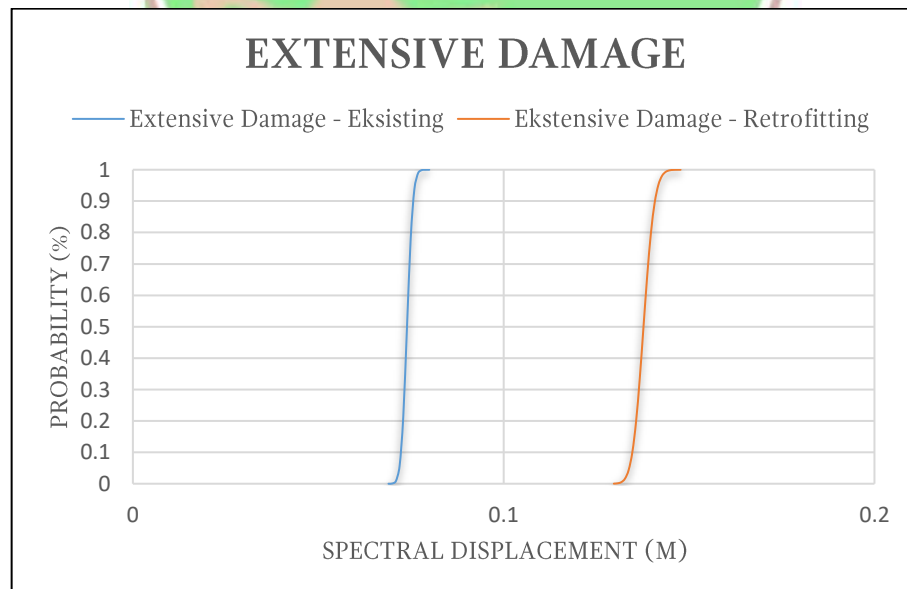
$$\text{Standar Deviasi } (\beta) = 0,017272$$

Tabel 4.71 Kondisi Extensive Damage (ED) Arah X – Bangunan Retrofitting

Spectral Displ.	Ln(Sd)	Ln(λ)	Ln(Sd)-Ln(λ)	(Ln(Sd)-Ln(λ)) / β	Probability
0.091610	-2.39022	-2.306493	-0.083722	-4.280713	0.0000
0.092610	-2.37936	-2.306493	-0.072865	-3.725611	0.0001
0.093610	-2.36862	-2.306493	-0.062125	-3.176470	0.0007
0.094610	-2.35799	-2.306493	-0.051499	-2.633164	0.0042

0.095610	-2.34748	-2.306493	-0.040985	-2.095571	0.0181
0.096610	-2.33707	-2.306493	-0.030580	-1.563571	0.0590
0.097610	-2.32678	-2.306493	-0.020283	-1.037050	0.1499
0.098610	-2.31658	-2.306493	-0.010090	-0.515896	0.3030
0.099610	-2.30649	-2.306493	0.0	0.0	0.5
0.100610	-2.29650	-2.306493	0.009989	0.510743	0.6952
0.101610	-2.28661	-2.306493	0.019879	1.016434	0.8453
0.102610	-2.27682	-2.306493	0.029673	1.517172	0.9354
0.103610	-2.26712	-2.306493	0.039371	2.013054	0.9779
0.104610	-2.25752	-2.306493	0.048977	2.504173	0.9939
0.105610	-2.24800	-2.306493	0.058491	2.990620	0.9986
0.106610	-2.23858	-2.306493	0.067915	3.472482	0.9997
0.107610	-2.22924	-2.306493	0.077251	3.949845	1.0000

Untuk kondisi *extensive damage* (ED) atau kerusakan berat, jika *spectral displacement* 0,096610 m (9,66 cm) maka probabilitas kerusakannya 6 % dan meningkat cepat probabilitasnya sampai 50 % ketika *spectral displacement* mencapai 0,099610 m (9,96 cm), dan probabilitasnya mencapai 100% saat *spectral displacement* nya sebesar 0,107610 m (10,76 cm).



Gambar 4.81 Kurva Fragiiltas Extensive Damage (ED) Arah X

d. Kondisi Complete Damage (CD)

1. Bangunan Eksisting

$$\text{Median } (\lambda) = 0,155849$$

$$\text{Standar Deviasi } (\beta) = 0,020574$$

Tabel 4.72 Kondisi Complete Damage (CD) Arah X – Bangunan Eksisting

Spectral Displ.	Ln(Sd)	Ln(λ)	Ln(Sd)-Ln(λ)	(Ln(Sd)-Ln(λ)) / β	Probability
0.143849	-1.93899	-1.858866	-0.080123	-3.894398	0.00
0.144849	-1.93206	-1.858866	-0.073196	-3.557678	0.0002
0.145849	-1.92518	-1.858866	-0.066316	-3.223275	0.0006
0.146849	-1.91835	-1.858866	-0.059483	-2.891157	0.0019
0.147849	-1.91156	-1.858866	-0.052696	-2.561293	0.0052
0.148849	-1.90482	-1.858866	-0.045955	-2.233652	0.0128
0.149849	-1.89813	-1.858866	-0.039259	-1.908205	0.0282
0.150849	-1.89147	-1.858866	-0.032608	-1.584923	0.0565
0.151849	-1.88487	-1.858866	-0.026001	-1.263777	0.1032
0.152849	-1.87830	-1.858866	-0.019437	-0.944739	0.1724
0.153849	-1.87178	-1.858866	-0.012916	-0.627781	0.2651
0.154849	-1.86530	-1.858866	-0.006437	-0.312877	0.3772
0.155849	-1.85887	-1.858866	0.0	0.0	0.5
0.156849	-1.85247	-1.858866	0.006396	0.310876	0.6221
0.157849	-1.84612	-1.858866	0.012751	0.619776	0.7323
0.158849	-1.83980	-1.858866	0.019066	0.926726	0.8230
0.159849	-1.83352	-1.858866	0.025342	1.231749	0.8910
0.160849	-1.82729	-1.858866	0.031578	1.534870	0.9376
0.161849	-1.82109	-1.858866	0.037776	1.836112	0.9668
0.162849	-1.81493	-1.858866	0.043936	2.135499	0.9836
0.163849	-1.80881	-1.858866	0.050058	2.433052	0.9925
0.164849	-1.80272	-1.858866	0.056142	2.728796	0.9968
0.165849	-1.79668	-1.858866	0.062190	3.022751	0.9987
0.166849	-1.79066	-1.858866	0.068202	3.314938	0.9995
0.167849	-1.78469	-1.858866	0.074177	3.605380	0.9998
0.168849	-1.77875	-1.858866	0.080117	3.894096	1.00

Untuk kondisi *complete damage* (CD) atau runtuh, jika *spectral displacement* 0,151849 m (15,18 cm) maka probabilitas kerusakannya 10 %, probabilitasnya sampai 50 % ketika *spectral displacement* mencapai 0,155849 m (15,58 cm) dan probabilitas runtuh 100 % ketika *spectral displacement* mencapai 0,168849 m (16,88) cm.

2. Bangunan Retrofitting

$$\text{Median } (\lambda) = 0,252029$$

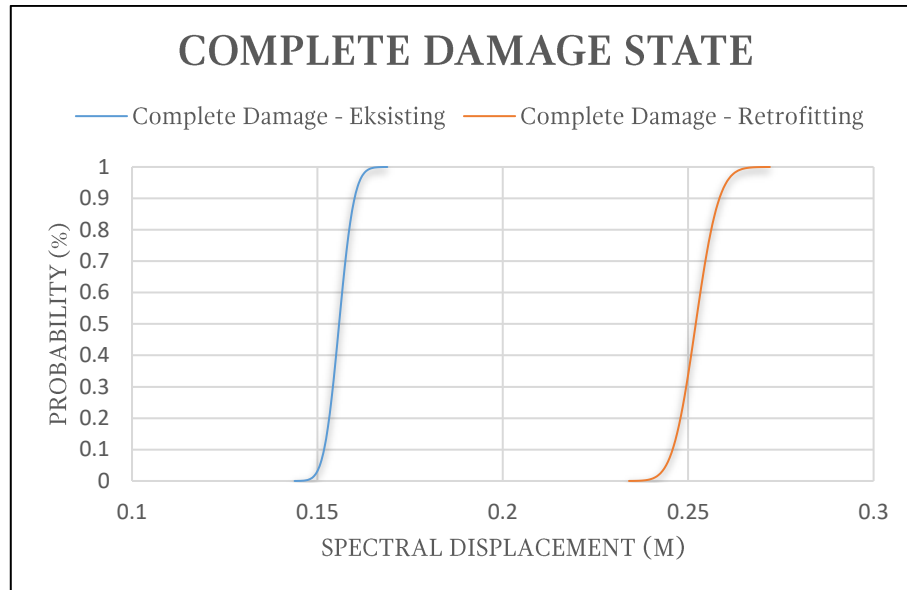
$$\text{Standar Deviasi } (\beta) = 0,019558$$

Tabel 4.73 Kondisi Complete Damage (CD) Arah X – Bangunan Retrofitting

Spectral Displ.	Ln(Sd)	Ln(λ)	Ln(Sd)-Ln(λ)	(Ln(Sd)-Ln(λ)) / β	Probability
0.234029	-1.45231	-1.378210	-0.074099	-3.788683	0.0001
0.235029	-1.44805	-1.378210	-0.069835	-3.570671	0.0002
0.236029	-1.44380	-1.378210	-0.065589	-3.353585	0.0004
0.237029	-1.43957	-1.378210	-0.061362	-3.137417	0.0009
0.238029	-1.43536	-1.378210	-0.057152	-2.922159	0.0017
0.239029	-1.43117	-1.378210	-0.052959	-2.707804	0.0034
0.240029	-1.42699	-1.378210	-0.048784	-2.494343	0.0063
0.241029	-1.42284	-1.378210	-0.044627	-2.281770	0.0113
0.242029	-1.41870	-1.378210	-0.040487	-2.070077	0.0192
0.243029	-1.41457	-1.378210	-0.036363	-1.859257	0.0315
0.244029	-1.41047	-1.378210	-0.032257	-1.649303	0.0495
0.245029	-1.40638	-1.378210	-0.028168	-1.440207	0.0749
0.246029	-1.40230	-1.378210	-0.024095	-1.231963	0.1090
0.247029	-1.39825	-1.378210	-0.020038	-1.024563	0.1528
0.248029	-1.39421	-1.378210	-0.015998	-0.818001	0.2067
0.249029	-1.39019	-1.378210	-0.011975	-0.612271	0.2702
0.250029	-1.38618	-1.378210	-0.007967	-0.407365	0.3419
0.251029	-1.38219	-1.378210	-0.003976	-0.203277	0.4195
0.252029	-1.37821	-1.378210	0.0	0.0	0.50
0.253029	-1.37425	-1.378210	0.003960	0.202472	0.5802
0.254029	-1.37031	-1.378210	0.007904	0.404145	0.6569

0.255029	-1.36638	-1.378210	0.011833	0.605026	0.7274
0.256029	-1.36246	-1.378210	0.015747	0.805120	0.7896
0.257029	-1.35857	-1.378210	0.019645	1.004435	0.8424
0.258029	-1.35468	-1.378210	0.023528	1.202976	0.8855
0.259029	-1.35081	-1.378210	0.027396	1.400749	0.9194
0.260029	-1.34696	-1.378210	0.031249	1.597759	0.9450
0.261029	-1.34312	-1.378210	0.035087	1.794014	0.9636
0.262029	-1.33930	-1.378210	0.038911	1.989518	0.9767
0.263029	-1.33549	-1.378210	0.042720	2.184277	0.9855
0.264029	-1.33170	-1.378210	0.046515	2.378298	0.9913
0.265029	-1.32792	-1.378210	0.050295	2.571585	0.9949
0.266029	-1.32415	-1.378210	0.054061	2.764144	0.9971
0.267029	-1.32040	-1.378210	0.057813	2.955980	0.9984
0.268029	-1.31666	-1.378210	0.061551	3.147099	0.9992
0.269029	-1.31294	-1.378210	0.065275	3.337507	0.9996
0.270029	-1.30923	-1.378210	0.068985	3.527208	0.9998
0.271029	-1.30553	-1.378210	0.072682	3.716208	0.9999
0.272029	-1.30185	-1.378210	0.076364	3.904512	1.0000

Untuk kondisi *complete damage (CD)* atau runtuh, jika *spectral displacement* 0,246029 m (24,6 cm) maka probabilitas kerusakannya 10 %, probabilitasnya sampai 50 % ketika *spectral displacement* mencapai 0,252029 m (25,2 cm) dan probabilitas runtuh 100 % ketika *spectral displacement* mencapai 0,272029 m (27,2 cm).



Gambar 4.82 Kurva Fragilitas Complete Damage (CD) Arah X

4.4.2 Fragility Curve – Y

a. Kondisi Slight Damage (SD)

1. Bangunan Eksisting

$$\text{Median } (\lambda) = 0,036398$$

$$\text{Standar Deviasi } (\beta) = 0,017272$$

Tabel 4.74 Kondisi Slight Damage (SD) Arah Y – Bangunan Eksisting

Spectral Displ.	$\ln(S_d)$	$\ln(\lambda)$	$\ln(S_d) - \ln(\lambda)$	$(\ln(S_d) - \ln(\lambda)) / \beta$	Probability
0.033398	-3.39927	-3.313250	-0.086019	-4.980231	0.00
0.034398	-3.36977	-3.313250	-0.056516	-3.272110	0.0005
0.035398	-3.34111	-3.313250	-0.027859	-1.612942	0.0534
0.036398	-3.31325	-3.313250	0.0	0.0	0.5
0.037398	-3.28615	-3.313250	0.027104	1.569223	0.9417
0.038398	-3.25976	-3.313250	0.053492	3.097034	0.9990
0.039398	-3.23405	-3.313250	0.079202	4.585563	1.00

Untuk kondisi *slight damage* (SD) atau kerusakan ringan, jika *spectral displacement* 0,035398 m (3,53 cm) dengan probabilitas kerusakannya 5%,

dan meningkat cepat probabilitas kerusakannya menjadi 50% disaat *spectral displacement* mencapai 0,036398 m (3,63 cm), dan probabilitas 100% saat *spectral displacement* nya 0,039398 m (3,93 cm).

2. Bangunan Retrofitting

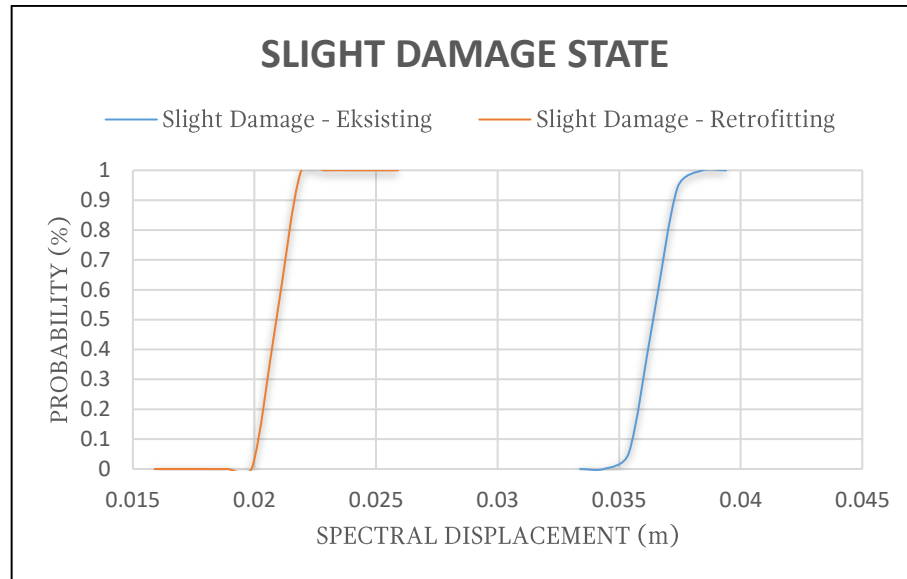
$$\text{Median } (\lambda) = 0,020901$$

$$\text{Standar Deviasi } (\beta) = 0,018796$$

Tabel 4.75 Kondisi Slight Damage (SD) Arah Y – Bangunan Retrofitting

Spectral Displ.	Ln(Sd)	Ln(λ)	Ln(Sd)-Ln(λ)	(Ln(Sd)-Ln(λ)) / β	Probability
0.015901	-4.14135	-3.867943	-0.273410	-14.546184	0.0
0.016901	-4.08036	-3.867943	-0.212420	-11.30136	0.0
0.017901	-4.02288	-3.867943	-0.154938	-8.243126	0.0
0.018901	-3.96852	-3.867943	-0.100581	-5.351166	0.0
0.019901	-3.91697	-3.867943	-0.049026	-2.608333	0.0045492
0.020901	-3.86794	-3.867943	0.0	0.0	0.5
0.021901	-3.82121	-3.867943	0.046735	2.486411	0.9935481
0.022901	-3.77656	-3.867943	0.091382	4.861790	0.9999994
0.023901	-3.73382	-3.867943	0.134121	7.135631	1.0
0.024901	-3.69283	-3.867943	0.175108	9.316261	1.0
0.025901	-3.65346	-3.867943	0.214482	11.411021	1.0

Untuk kondisi *slight damage (SD)* atau kerusakan ringan, jika *spectral displacement* 0,019901 m (1,99 cm) dengan probabilitas kerusakannya 0,4 %, dan meningkat cepat probabilitas kerusakannya menjadi 50% disaat *spectral displacement* mencapai 0,020901 m (2,09 cm), dan probabilitas 100% saat *spectral displacement* nya 0,025901 m (2,59 cm).



Gambar 4.83 Kurva Fragilitas Slight Damage (SD) Arah Y

b. Kondisi Moderate Damage (MD)

1. Bangunan Eksisting

$$\text{Median } (\lambda) = 0,051997$$

$$\text{Standar Deviasi } (\beta) = 0,017018$$

Tabel 4.76 Kondisi Moderate Damage (MD) – Bangunan Eksisting

Spectral Displ.	Ln(Sd)	Ln(λ)	Ln(Sd)-Ln(λ)	(Ln(Sd)-Ln(λ)) / β	Probability
0.047997	-3.03662	-2.956575	-0.080048	-4.703724	0.00
0.048997	-3.01600	-2.956575	-0.059427	-3.492025	0.0002
0.049997	-2.99580	-2.956575	-0.039223	-2.304809	0.0106
0.050997	-2.97599	-2.956575	-0.019419	-1.141105	0.1269
0.051997	-2.95657	-2.956575	0.0	0.0	0.5
0.052997	-2.93753	-2.956575	0.019049	1.119367	0.8685
0.053997	-2.91883	-2.956575	0.037743	2.217809	0.9867
0.054997	-2.90048	-2.956575	0.056093	3.296093	0.9995
0.055997	-2.88246	-2.956575	0.074112	4.354947	1.00

Untuk kondisi *moderate damage* (MD) atau kerusakan menengah, jika *spectral displacement* 0,050997 m (5,09 cm) maka probabilitas kerusakannya 13 % dan meningkat cepat probabilitasnya sampai 50 %

ketika *spectral displacement* mencapai 0,051997 m (5,19 cm), dan probabilitasnya mencapai 100 % saat *spectral displacement* nya.

2. Bangunan Retrofitting

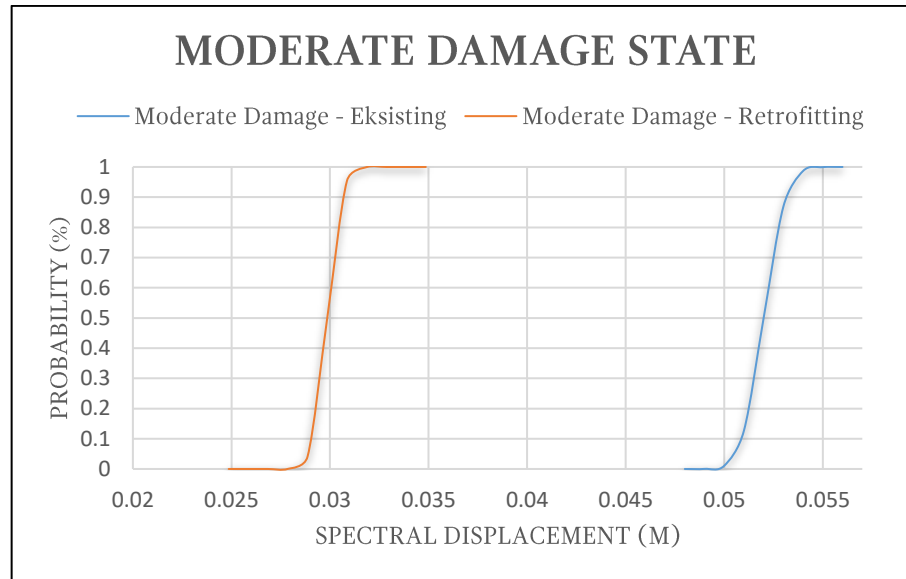
$$\text{Median } (\lambda) = 0,029859$$

$$\text{Standar Deviasi } (\beta) = 0,019558$$

Tabel 4.77 Kondisi Moderate Damage Arah Y – Bangunan Retrofitting

Spectral Displ.	Ln(Sd)	Ln(λ)	Ln(Sd)-Ln(λ)	(Ln(Sd)-Ln(λ)) / β	Probability
0.024859	-3.69453	-3.511268	-0.183266	-9.370394	0.0
0.025859	-3.65510	-3.511268	-0.143827	-7.353891	0.0
0.026859	-3.61715	-3.511268	-0.105885	-5.413907	0.0
0.027859	-3.58060	-3.511268	-0.069330	-3.544848	0.00020
0.028859	-3.54533	-3.511268	-0.034064	-1.741709	0.04078
0.029859	-3.51127	-3.511268	0.0	0.0	0.5
0.030859	-3.47833	-3.511268	0.032942	1.684329	0.95394
0.031859	-3.44643	-3.511268	0.064834	3.314937	0.99954
0.032859	-3.41553	-3.511268	0.095739	4.895146	1.0
0.033859	-3.38555	-3.511268	0.125718	6.427977	1.0
0.034859	-3.35644	-3.511268	0.154825	7.916191	1.0

Untuk kondisi *moderate damage* (MD) atau kerusakan menengah, jika *spectral displacement* 0,028859m (2,88 cm) maka probabilitas kerusakannya 4 % dan meningkat cepat probabilitasnya sampai 50 % ketika *spectral displacement* mencapai 0,029859 m (2,98 cm), dan probabilitasnya mencapai 100 % saat *spectral displacement* nya 0,034859 m (3,48 cm).



Gambar 4.84 Kurva Fragilitas Moderate Damage (MD) Arah Y

c. Kondisi Extensive Damage (ED)

1. Bangunan Eksisting

$$\text{Median } (\lambda) = 0,085671$$

$$\text{Standar Deviasi } (\beta) = 0,017272$$

Tabel 4.78 Kondisi Extensive Damage Arah Y – Bangunan Eksisting

Spectral Displ.	Ln(Sd)	Ln(λ)	Ln(Sd)-Ln(λ)	(Ln(Sd)-Ln(λ)) / β	Probability
0.079671	-2.52985	-2.457238	-0.072609	-4.203829	0.00
0.080671	-2.51737	-2.457238	-0.060135	-3.481650	0.0002
0.081671	-2.50505	-2.457238	-0.047815	-2.768369	0.0028
0.082671	-2.49288	-2.457238	-0.035645	-2.063768	0.0195
0.083671	-2.48086	-2.457238	-0.023622	-1.367640	0.0857
0.084671	-2.46898	-2.457238	-0.011741	-0.679782	0.2483
0.085671	-2.45724	-2.457238	0.0	0.0	0.5
0.086671	-2.44563	-2.457238	0.011605	0.671893	0.7492
0.087671	-2.43416	-2.457238	0.023077	1.336078	0.9092
0.088671	-2.42282	-2.457238	0.034418	1.992730	0.9769
0.089671	-2.41161	-2.457238	0.045633	2.642017	0.9959
0.090671	-2.40052	-2.457238	0.056723	3.284104	0.9995
0.091671	-2.38955	-2.457238	0.067692	3.919148	1.00

Untuk kondisi *extensive damage (ED)* atau kerusakan berat, jika *spectral displacement* 0,083671 m (8,36 cm) maka probabilitas kerusakannya 9 % dan meningkat cepat probabilitasnya sampai 50 % ketika *spectral displacement* mencapai 0,085671 m (8,56 cm), dan probabilitasnya mencapai 100% saat *spectral displacement* nya sebesar 0,091671 m (9,16 cm).

2. BangunanRetrofitting

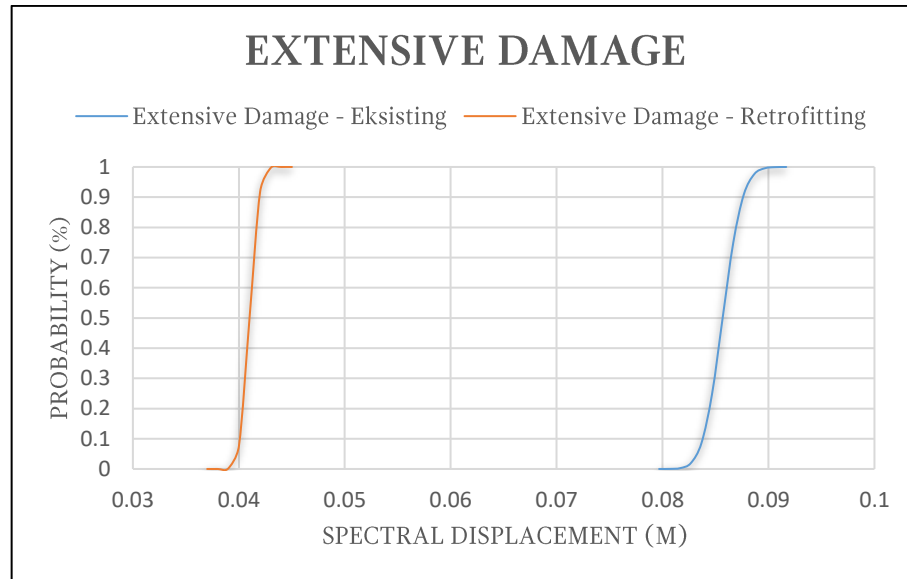
$$\text{Median } (\lambda) = 0,047238$$

$$\text{Standar Deviasi } (\beta) = 0,017272$$

Tabel 4.79 Kondisi Extensive Damage (ED) Arah Y – Bangunan Retrofitting

Spectral Displ.	Ln(Sd)	Ln(λ)	Ln(Sd)-Ln(λ)	(Ln(Sd)-Ln(λ)) / β	Probability
0.037013	-3.29650	-3.193878	-0.102621	-5.941475	0.0
0.038013	-3.26984	-3.193878	-0.075962	-4.397974	0.00001
0.039013	-3.24387	-3.193878	-0.049995	-2.894556	0.00190
0.040013	-3.21856	-3.193878	-0.024685	-1.429191	0.07647
0.041013	-3.19388	-3.193878	0.0	0.0	0.5
0.042013	-3.16979	-3.193878	0.024090	1.394759	0.91846
0.043013	-3.14626	-3.193878	0.047614	2.756707	0.99708
0.044013	-3.12328	-3.193878	0.070597	4.087353	0.99998
0.045013	-3.10081	-3.193878	0.093063	5.388102	1.0

Untuk kondisi *extensive damage (ED)* atau kerusakan berat, jika *spectral displacement* 0,040013 m (4 cm) maka probabilitas kerusakannya 7 % dan meningkat cepat probabilitasnya sampai 50 % ketika *spectral displacement* mencapai 0,041013 m (4,10 cm), dan probabilitasnya mencapai 100% saat *spectral displacement* nya sebesar 0,045013 m (4,5 cm)



Gambar 4.85 Kurva Fragilitas Extensive Damage (ED) Arah Y

d. Kondisi Complete Damage (CD)

1. Bangunan Eksisting

$$\text{Median } (\lambda) = 0,186695$$

$$\text{Standar Deviasi } (\beta) = 0,020574$$

Tabel 4.80 Kondisi Complete Damage (CD) Arah Y – Bangunan Eksisting

Spectral Displ.	Ln(Sd)	Ln(λ)	Ln(Sd)-Ln(λ)	(Ln(Sd)-Ln(λ)) / β	Probability
0.171695	-1.76204	-1.678280	-0.083757	-4.071000	0.00
0.172695	-1.75623	-1.678280	-0.077949	-3.788731	0.0001
0.173695	-1.75046	-1.678280	-0.072175	-3.508092	0.0002
0.174695	-1.74472	-1.678280	-0.066435	-3.229064	0.0006
0.175695	-1.73901	-1.678280	-0.060727	-2.951629	0.0016
0.176695	-1.73333	-1.678280	-0.055051	-2.675769	0.0037
0.177695	-1.72769	-1.678280	-0.049408	-2.401465	0.0082
0.178695	-1.72208	-1.678280	-0.043796	-2.128701	0.0166
0.179695	-1.71650	-1.678280	-0.038215	-1.857459	0.0316
0.180695	-1.71095	-1.678280	-0.032666	-1.587722	0.0562
0.181695	-1.70543	-1.678280	-0.027147	-1.319474	0.0935
0.182695	-1.69994	-1.678280	-0.021658	-1.052698	0.1462

0.183695	-1.69448	-1.678280	-0.016200	-0.787378	0.2155
0.184695	-1.68905	-1.678280	-0.010770	-0.523499	0.3003
0.185695	-1.68365	-1.678280	-0.005371	-0.261045	0.3970
0.186695	-1.67828	-1.678280	0.0	0.0	0.5
0.187695	-1.67294	-1.678280	0.005342	0.259650	0.6024
0.188695	-1.66762	-1.678280	0.010656	0.517921	0.6977
0.189695	-1.66234	-1.678280	0.015941	0.774826	0.7808
0.190695	-1.65708	-1.678280	0.021199	1.030381	0.8486
0.191695	-1.65185	-1.678280	0.026429	1.284599	0.9005
0.192695	-1.64665	-1.678280	0.031632	1.537494	0.9379
0.193695	-1.64147	-1.678280	0.036809	1.789080	0.9632
0.194695	-1.63632	-1.678280	0.041958	2.039371	0.9793
0.195695	-1.63120	-1.678280	0.047081	2.288380	0.9889
0.196695	-1.62610	-1.678280	0.052178	2.536119	0.9944
0.197695	-1.62103	-1.678280	0.057249	2.782602	0.9973
0.198695	-1.61599	-1.678280	0.062295	3.027841	0.9988
0.199695	-1.61097	-1.678280	0.067315	3.271849	0.9995
0.200695	-1.60597	-1.678280	0.072310	3.514638	0.9998
0.201695	-1.60100	-1.678280	0.077280	3.756221	0.9999
0.202695	-1.59605	-1.678280	0.082226	3.996609	1.00

Untuk kondisi *complete damage* (CD) atau runtuh, jika *spectral displacement* 0,182695 m (18,26) cm maka probabilitas kerusakannya 15 %, probabilitasnya sampai 50 % ketika *spectral displacement* mencapai 0,186695 m (18,66 cm) dan probabilitas runtuh 100 % ketika *spectral displacement* mencapai 0,202695 m (19,76 cm).

2. Bangunan Retrofitting

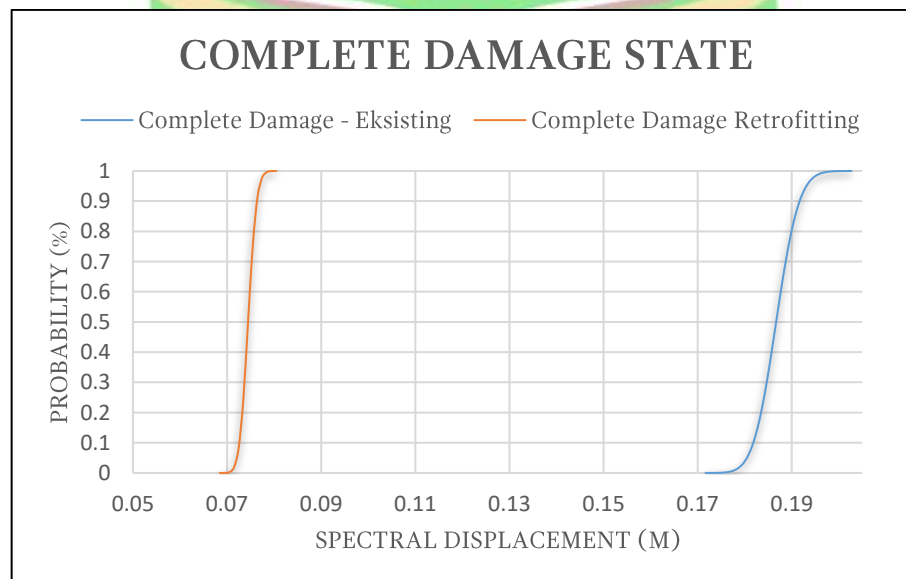
$$\text{Median } (\lambda) = 0,074473$$

$$\text{Standar Deviasi } (\beta) = 0,019558$$

Tabel 4.81 Kondisi Complete Damage (CD) Arah Y – Bangunan Retrofitting

Spectral Displ.	Ln(Sd)	Ln(λ)	Ln(Sd)-Ln(λ)	(Ln(Sd)-Ln(λ)) / β	Probability
0.068473	-2.68132	-2.597319	-0.083997	-4.294774	0.0000
0.069473	-2.66682	-2.597319	-0.069498	-3.553456	0.0002
0.070473	-2.65253	-2.597319	-0.055207	-2.822733	0.0024
0.071473	-2.63844	-2.597319	-0.041117	-2.102307	0.0178
0.072473	-2.62454	-2.597319	-0.027223	-1.391890	0.0820
0.073473	-2.61084	-2.597319	-0.013519	-0.691209	0.2447
0.074473	-2.59732	-2.597319	0.0	0.0	0.5
0.075473	-2.58398	-2.597319	0.013338	0.681989	0.7524
0.076473	-2.57082	-2.597319	0.026501	1.355001	0.9123
0.077473	-2.55783	-2.597319	0.039493	2.019269	0.9783
0.078473	-2.54500	-2.597319	0.052318	2.675018	0.9963
0.079473	-2.53234	-2.597319	0.064981	3.322463	0.9996
0.080473	-2.51983	-2.597319	0.077485	3.961812	1.00

Untuk kondisi *complete damage* (CD) atau runtuh, jika *spectral displacement* 0,072473 m (7,24 cm) maka probabilitas kerusakannya 8,2 %, probabilitasnya sampai 50 % ketika *spectral displacement* mencapai 0,074473 m (7,44 cm) dan probabilitas runtuh 100 % ketika *spectral displacement* mencapai 0,080473m (8,04 cm).



Gambar 4.86 Kurva Fragilitas Complete Damage (CD) Arah Y

4.5 Perbandingan Kinerja Struktur Bangunan Eksisting dan Retrofitting

4.5.1 Perbandingan Level Kinerja Struktur

4.5.1.1 Applied Technology Council (ATC) - 40

Berdasarkan hasil analisis pushover dan penentuan performance point dengan metode ATC-40, diperoleh nilai simpangan atap maksimum dan simpangan inelastis maksimum yang digunakan untuk menentukan rasio *drift* global struktur.

Tabel 4.82 Rekap level Kinerja Bangunan Eksisting

Bangunan Eksisting					
Arah X			Arah Y		
<i>Drift Total</i>	=	0,0151 (Damage Control)	<i>Drift Total</i>	=	0,0148 (Damage Control)
<i>Drift Inelastis</i>	=	0,01356 (Damage Control)	<i>Drift Inelastis</i>	=	0,01387 (Damage Control)

Tabel 4.83 Rekap level Kinerja Bangunan Retrofitting

Bangunan Retrofitting					
Arah X			Arah Y		
<i>Drift Total</i>	=	0,0058 ≈ 0,01 (Immediate Occupancy)	<i>Drift Total</i>	=	0,009 ≈ 0,01 (Immediate Occupancy)
<i>Drift Inelastis</i>	=	0,0050 ≈ 0,01 (Immediate Occupancy)	<i>Drift Inelastis</i>	=	0,0082 (Damage Control)

Untuk rasio penurunan *drift* dihitung berdasarkan persamaan berikut.

$$\text{Rasio Penurunan} = \frac{\theta_{\text{eksisting}} - \theta_{\text{retrofitting}}}{\theta_{\text{eksisting}}} \times 100\% \quad \text{Persamaan 13}$$

a. Rasio Penurunan *Drift* Arah X

1) *Drift Total*

$$\text{Rasio Penurunan} = \frac{0,0151 - 0,0058}{0,0151} \times 100\% = 61,58\%$$

2) *Drift Inelastis*

$$\text{Rasio Penurunan} = \frac{0,01356 - 0,0050}{0,01356} \times 100\% = 63,12\%$$

b. Rasio Penurunan *Drift* Arah Y

1) *Drift* Totalf

$$Rasio\ Penurunan = \frac{0,0148 - 0,009}{0,0148} \times 100\% = 39,18\%$$

2) *Drift* Inelastis

$$Rasio\ Penurunan = \frac{0,01387 - 0,0082}{0,01387} \times 100\% = 40,87\%$$

Kondisi diatas menunjukkan bahwa struktur eksisting mengalami perilaku inelastis yang cukup signifikan dibandingkan dengan struktur retrofitting. Peningkatan level kinerja ini menegaskan bahwa penambahan dinding geser secara efektif menurunkan tingkat kerentanan struktur dan meningkatkan kemampuan struktur menahan gempa.

4.5.1.2 FEMA (Federal Emergency Management Agency) - 356

FEMA (Federal Emergency Management Agency) 356			
Arah X		Arah Y	
Bangunan Eksisting	0,1843 m = 0,80% (Immediate Occupancy)	Bangunan Eksisting	0,1667 m = 0,72% (Immediate Occupancy)
Bangunan Retrofitting	0,1029 m = 0,45% (Fully Operational)	Bangunan Retrofitting	0,1145 m = 0,49% (Fully Operational)

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pembahasan dan analisa dari studi komparasi ini, maka dapat ditarik kesimpulan hasil analisis penelitian yang dilakukan untuk mencapai tujuan utama daripada studi ini. Berikut adalah kesimpulan daripada penelitian ini.

1. Kinerja seismik struktur gedung sangat dipengaruhi oleh sistem penahan gaya lateral yang digunakan. Hasil analisis pushover menunjukkan bahwa struktur tanpa dinding geser memiliki kapasitas lateral dan kekakuan yang lebih rendah, yang berdasar dari nilai perpindahan atap dan simpangan antar tingkat yang lebih besar dibandingkan struktur dengan dinding geser.
2. Kerentanan struktur gedung tanpa dinding geser berdasarkan analisis pushover menunjukkan bahwa struktur gedung dinding geser memiliki tingkat kerentanan yang lebih tinggi dibandingkan struktur gedung dengan penambahan dinding geser.
3. Tingkat kinerja struktur hasil evaluasi berbasis FEMA 356 menunjukkan perbedaan yang jelas antara kedua kondisi struktur. Bangunan tanpa dinding geser cenderung mencapai tingkat kinerja yang lebih rendah pada kondisi gempa rencana, sedangkan bangunan dengan dinding geser mampu mencapai tingkat kinerja yang lebih baik dengan perpindahan yang lebih terkendali.
4. Kurva fragilitas yang dikembangkan berdasarkan metodologi HAZUS menunjukkan bahwa struktur dengan dinding geser memiliki probabilitas kerusakan yang lebih rendah pada setiap tingkat kerusakan (slight, moderate, extensive, hingga collapse) dibandingkan struktur tanpa dinding geser pada intensitas gempa yang sama.

5. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan dinding geser memberikan peningkatan kinerja dan penurunan kerentanan seismik pada gedung beton bertulang lima lantai,

5.2 Saran

- a. Berdasarkan hasil evaluasi kinerja seismik dan analisis kurva fragilitas, perkuatan struktur menggunakan dinding geser direkomendasikan untuk diterapkan pada bangunan pendidikan yang memiliki tingkat kinerja seismik belum optimal. Penerapan dinding geser terbukti efektif dalam meningkatkan kekakuan dan kapasitas lateral struktur, mengurangi simpangan, serta menurunkan probabilitas kerusakan akibat gempa bumi.
- b. Berdasarkan hasil analisis kurva fragilitas, bangunan eksisting memiliki tingkat kerentanan yang cukup tinggi terhadap gempa, sehingga disarankan untuk dilakukan upaya perkuatan struktur guna meningkatkan kinerja seismik bangunan dan mengurangi risiko kerusakan pada saat terjadi gempa.
- c. Penerapan dinding geser sebagai sistem *retrofitting* terbukti mampu meningkatkan kapasitas dan menurunkan probabilitas kerusakan struktur, sehingga metode ini dapat dipertimbangkan sebagai salah satu alternatif perkuatan pada bangunan beton bertulang dengan karakteristik serupa.
- d. Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan awal bagi perencana dan pemangku kepentingan dalam mengevaluasi kebutuhan *retrofitting* bangunan eksisting di wilayah rawan gempa.