

KINERJA SEISMIK SISTEM RANGKA PEMIKUL MOMEN BEBAN GRAVITASI DENGAN SCWB DAN WCSB PADA GEDUNG BAJA 5 LANTAI

Aji Setiawan¹, Andy Prabowo^{1*}, dan Sunarjo Leman²

¹Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
*andy.prabowo@ft.untar.ac.id

Masuk: 07-12-2025, revisi: 18-01-2026, diterima untuk diterbitkan: 26-01-2026

ABSTRACT

This study reviews the performance of the special moment resisting frame (SMRF) structure of steel structure buildings using highly ductile member (HDM) steel profiles in high seismic areas against gravity loads as a 'baseline' before further seismic analysis is carried out aimed at evaluating the performance level, how many performance points, collapse patterns, and capacity curves. This study conducted structural modeling into 4 models, model 1 was designed using joint placement and strong column weak beam (SCWB) steel profiles. Model 2 was designed using clamped placement and SCWB steel profiles. Model 3 was designed using joint placement and weak column strong beam (WCSB) steel profiles. Model 4 was designed using clamped placement and WCSB steel profiles. Then from the four models, a pushover analysis was carried out to compare the performance of the building structure which model is better. Through the performance evaluation method, namely the capacity spectrum method (CSM), the results of the study show that model 2 shows the best balance between stiffness and the highest capacity and maintains high elastic and strength performance, making it the most efficient and safe design choice.

Keywords: SMRF; SCWB; gravity load; pushover analysis; steel structure

ABSTRAK

Penelitian ini meninjau kinerja struktur sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) bangunan struktur baja menggunakan profil baja *highly ductile member* (HDM) di wilayah seismik tinggi terhadap beban gravitasi sebagai 'baseline' sebelum dilakukan analisis seismik lebih lanjut bertujuan untuk evaluasi level kinerja, berapa *performance point*, pola runtuh, dan kurva kapasitas. Penelitian ini dilakukan pemodelan struktur menjadi 4 model, model 1 dirancang menggunakan perletakan sendi serta profil baja *strong column weak beam* (SCWB). Model 2 dirancang menggunakan perletakan jepit serta profil baja SCWB. Model 3 dirancang menggunakan perletakan sendi serta profil baja *weak column strong beam* (WCSB). Model 4 dirancang menggunakan perletakan jepit serta profil baja WCSB. Kemudian dari keempat model tersebut dilakukan analisis *pushover* untuk membandingkan kinerja struktur bangunan model mana yang lebih baik. Melalui metode evaluasi kinerja yaitu *capacity spectrum method* (CSM), hasil penelitian bahwa pada model 2 menunjukkan keseimbangan terbaik antara kekakuan dan kapasitas tertinggi serta mempertahankan kinerja elastis dan kekuatan yang tinggi sehingga menjadikannya pilihan desain yang paling efisien dan aman.

Kata kunci: SRPMK; SCWB; beban gravitasi; analisis *pushover*; struktur baja

1. PENDAHULUAN

Seringnya terjadi gempa bumi di Indonesia menuntut perencana struktur untuk menyediakan sistem pemikul beban lateral pada bangunan, tidak terlepas pada struktur bangunan baja. Di antara sistem-sistem struktur yang tersedia, sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) banyak diterapkan dikarenakan daktilitasnya yang tinggi dan disukai arsitek karena desainnya yang multifungsi (Prabowo et al., 2025). Menurut SNI 1726:2019 pasal 4.1.1 "Gempa rencana ditetapkan sebagai gempa dengan kemungkinan terlampaui besarnya selama umur struktur bangunan 50 tahun adalah sebesar 2 %". Gempa dengan kemungkinan terlampaui 2% dalam 50 tahun setara dengan gempa yang terjadi rata-rata sekali setiap 2.475 tahun. Nilai ini dikenal sebagai MCE_R (*risk-targeted maximum considered earthquake*). Beban gravitasi sangat penting dalam tahap awal analisis untuk menentukan tingkat kinerja struktur. Hal ini diperlukan karena beban gravitasi mempengaruhi gaya dorong struktur. Tahap ini terjadi karena beban gravitasi bekerja lebih dahulu sebelum terjadinya beban gempa. Dengan demikian gaya dalam yang terjadi akibat beban gravitasi lebih dahulu timbul daripada gaya dalam akibat beban gempa. Dengan timbulnya gaya dalam pada balok dan kolom, akan mempengaruhi kapasitas momen yang terjadi, perilaku sendi plastis dan penyebaran gaya dalam saat terjadi gempa. Pengaruh lainnya adalah daktilitas struktur yang ditimbulkan akibat beban gravitasi terutama kolom

sebagai elemen tekan yang menerima gaya aksial yang besar, akan lebih dahulu terjadi sendi plastis pada tahap awal karena akan mempengaruhi mekanisme struktur yang dirancang sebagai kolom kuat balok lemah. Daktilitas ini memungkinkan struktur mengalami deformasi berulang tanpa runtuh, bahkan saat terjadi gempa bumi kuat, sehingga meminimalkan korban jiwa dan kerusakan material (Amhudo & Utomo, 2024). Masalah lain yang terjadi akibat beban gravitasi yaitu kapasitas struktur akan menurun dan titik kinerja akan mengalami perubahan. Selain itu efek lanjutan dari beban gravitasi akan menimbulkan momen tambahan karena adanya efek p -delta. Baja memiliki sifat daktilitas yang tinggi, karena suatu batang baja yang menerima tegangan tarik yang tinggi akan mengalami regangan tarik yang cukup besar sebelum terjadi keruntuhan (Zachari & Turuallo, 2020).

Dalam sistem ini, sambungan antara balok dan kolom memiliki peranan penting dalam menahan gaya gempa, terutama pada elemen panel zone, yaitu daerah pertemuan balok–kolom yang menerima beban geser dan lentur. Bangunan tanpa panel zone menunjukkan perilaku struktur yang lebih kaku, panel zone dapat dikatakan berperan penting dalam meningkatkan ketahanan seismik struktur baja bertingkat, meskipun perencanaannya perlu dilakukan secara cermat agar tetap menjaga keseimbangan antara kekakuan dan kemampuan deformasi struktur (Rasuna et al., 2025).

Penelitian berfokus pada perilaku daktilitas struktur SRPMK terhadap beban gravitasi dengan bertujuan untuk evaluasi level kinerja, *performance point*, pola runtuh, dan kurva kapasitas. Selanjutnya, dilakukan perbandingan perilaku daktilitas antar variasi struktur tersebut untuk menentukan performa terbaik. Hasil analisis ini diharapkan menjadi landasan bagi pemberi tugas dalam pengambilan keputusan terkait perencanaan serupa maupun upaya optimasi biaya konstruksi.

Pushover analysis

Analisis kinerja struktur berdasarkan FEMA 440 menggunakan *displacement control* dengan mengevaluasi kurva arah x dan arah y pada *performance point* (titik kinerja) yang dimana kapasitas struktur mampu menahan gaya lateral akibat beban gravitasi yang diberikan. Kemudian dapat diketahui tingkat kerusakan struktur berdasarkan perpindahan lateral (*drift*).

Evaluasi kinerja seismik struktur dilakukan melalui pendekatan *capacity spectrum method* (CSM), sebuah prosedur desain berbasis kinerja berdasarkan FEMA 440 untuk memprediksi respon dan tingkat kerusakan bangunan akibat gempa. Proses ini diawali dengan mengolah data bersumber dari analisis *pushover* statik *nonlinier* yang menghasilkan kurva kapasitas struktur ($V-\Delta$). Kurva ini merepresentasikan hubungan antara gaya geser dasar (V) yang dapat ditahan oleh struktur dan perpindahan puncak atap (Δ) yang terjadi.

Pada metode CSM konversi kurva kapasitas ($V-\Delta$) menjadi *domain* spektral $S_a - S_d$. S_d adalah perpindahan spektral dan S_a adalah percepatan spektral diperoleh dengan menormalisasi V terhadap berat efektif modal pertama. Konversi ini memungkinkan perbandingan langsung antara kemampuan struktur atau kurva kapasitas dengan kebutuhan gempa pada satu grafik yang sama. Titik perpotongan antara kurva kapasitas spektral ($S_a - S_d$) dan spektrum permintaan gempa yang telah direduksi (*demand spectrum*) kemudian didefinisikan sebagai titik kinerja (*performance point*). Titik ini menunjukkan respon perpindahan dan percepatan puncak yang realistis akan dialami struktur di bawah tingkat gempa yang disimulasikan.

Untuk menilai fleksibilitas dan optimasi desain, hasil kinerja tersebut kemudian dibandingkan dengan nilai dari empat model desain yang berbeda. Perbandingan yang ditinjau berdasarkan tingkat desain gempa yang berbeda, melalui perbandingan ini dapat mengidentifikasi model desain yang paling efisien dalam memenuhi tujuan kinerja seismik tertentu (misalnya, *life safety* atau *immediate occupancy*) dengan biaya dan material yang paling optimal.

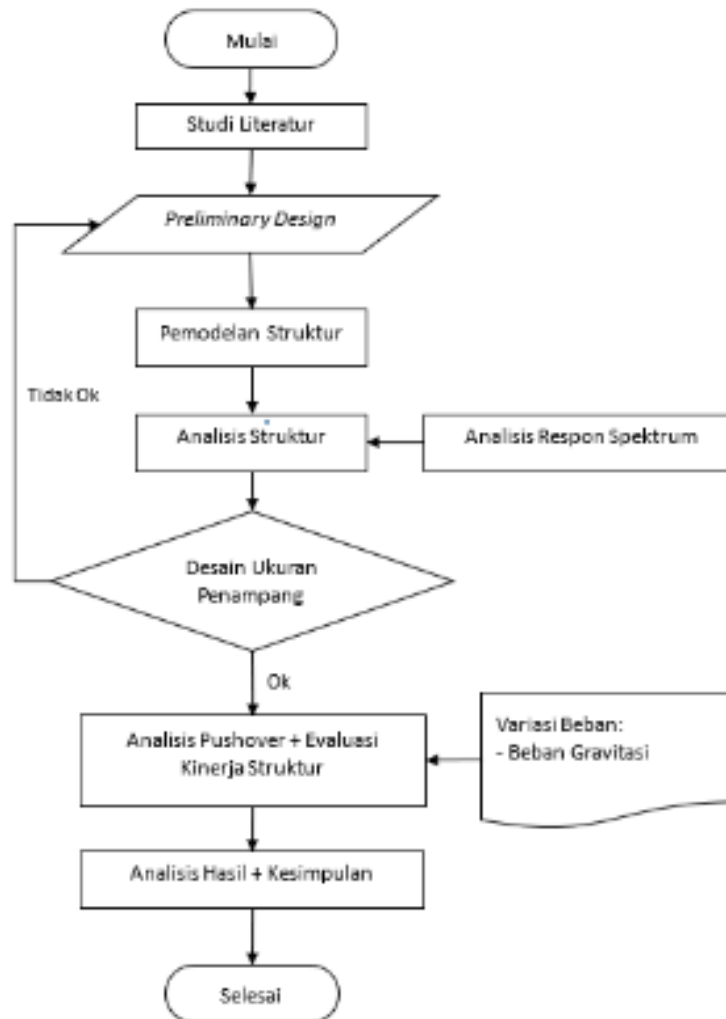
Aspek terpenting dari penelitian ini adalah validasi perilaku *nonlinier* struktur yang dicapai dengan menganalisis urutan formasi sendi plastis. Kepatuhan terhadap prinsip *strong column weak beam* (SCWB) menjadi patokan utama. Prinsip SCWB menyatakan bahwa balok harus mencapai batas leleh (*yield*) dan membentuk sendi plastis sebelum kolom mencapai batas lelehnya. Tujuannya adalah untuk memastikan mekanisme kegagalan struktur didominasi oleh sendi plastis pada ujung-ujung balok, membiarkan kolom tetap elastis dan berfungsi sebagai elemen penopang vertikal utama untuk mencegah keruntuhan struktur yang mendadak (Prasetyo & Yasir, 2024). Analisis yang menunjukkan sendi plastis terbentuk pada kolom terlebih dahulu akan mengindikasikan perlunya modifikasi desain struktural.

Pemeriksaan dilakukan pada kriteria *displacement control*, memastikan bahwa gaya lateral diterapkan dengan mengontrol perpindahan struktur secara bertahap dan kriteria konvergensi (*convergence*). Konvergensi menjamin bahwa setiap langkah iterasi *nonlinier* dalam analisis *pushover* telah mencapai keseimbangan antara gaya eksternal yang diterapkan dan gaya internal yang dikembangkan oleh struktur dalam batas toleransi yang sangat ketat. Pemenuhan kriteria kontrol dan konvergensi ini adalah bukti bahwa hasil yang didapatkan stabil, akurat, dan dapat dipercaya dalam pengambilan keputusan rancangan.

2. METODE PENELITIAN

Dalam studi penelitian ini digunakan sistem SRPMK yang menjadi fokus utama dengan penerapan beban gravitasi sebagai pembebanan utama untuk menentukan kinerja struktur serta mengkaji perilaku daktilitas struktur tersebut apabila hanya diberikan beban gravitasi tanpa diberikan beban gempa melalui metode evaluasi kinerja struktur menggunakan CSM terhadap level intensitas gempa *maximum considered earthquake* (MCE) yang mengambil periode ulang 2500 tahunan. Pada penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dan simulasi numerik berbasis analisis struktur nonlinier. Tujuan utama adalah melakukan kinerja struktur baja 5 lantai dengan sistem SRPMK tahan gempa akibat beban gravitasi. Tinjauan ini mencakup kapasitas momen kolom balok, titik sendi plastis, kurva kapasitas dan tingkat kinerja struktur berdasarkan *performance point*.

Tahapan penelitian ini disajikan dalam bentuk diagram alir dan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Pemodelan dan analisis struktur

Penelitian ini dilakukan dengan merancang struktur bangunan menjadi 4 model menggunakan MIDAS GEN 2024 guna untuk mengevaluasi kinerja struktur pada masing-masing keempat model tersebut kemudian dibandingkan kinerja struktur pada model mana yang lebih baik menggunakan *pushover analysis*. Model 1 dirancang menggunakan perletakan sendi serta penampang profil baja telah memenuhi persyaratan dalam ketentuan SCWB. Model 2 dirancang menggunakan perletakan jepit serta penampang profil baja telah memenuhi persyaratan dalam ketentuan SCWB. Model 3 dirancang menggunakan perletakan sendi serta penampang profil baja *weak column strong beam* (WCSB). Model 4 dirancang menggunakan perletakan jepit serta penampang profil baja WCSB.

Penyertaan model struktur WCSB dalam penelitian ini dimaksudkan sebagai model dasar (*baseline model*) untuk keperluan analisis komparatif. Dengan adanya model WCSB, penelitian ini dapat mengevaluasi secara kuantitatif

sejauh mana efektivitas penerapan filosofi desain kapasitas dalam meningkatkan daktilitas dan kemampuan disipasi energi struktur. Selain itu, model ini berfungsi untuk mensimulasikan mekanisme kegagalan kolom (*column sway mechanism*) sebagai bentuk validasi terhadap risiko keruntuhan getas yang dihindari dalam standar perencanaan gempa (SNI 1726:2019). Melalui *Pushover Analysis* pada model WCSB ini, letak sendi plastis (*plastic hinges*) dapat dipetakan secara akurat untuk menunjukkan pola keruntuhan lantai tingkat (*soft story mechanism*) yang umumnya terjadi pada bangunan dengan kolom yang lebih lemah dibandingkan baloknya. Tujuan utama pemodelan WCSB bukan untuk melegalkan desain yang salah, melainkan untuk memvalidasi teori desain kapasitas. Secara spesifik, model WCSB digunakan untuk memicu terjadinya Mekanisme Sendi Plastis pada Kolom (*Column Sway Mechanism*). Melalui *Pushover Analysis*, ingin dibuktikan secara numerik bahwa jika SCWB diabaikan sendi plastis akan terkonsentrasi di kolom yang menyebabkan struktur menjadi tidak stabil (*instabil*) dan rentan terhadap keruntuhan total (*total collapse*). Dengan membandingkan kedua model, bisa didapatkan selisih parameter kinerja yang jelas, seperti Nilai Faktor Modifikasi Respons (*R*) Apakah gedung WCSB masih memiliki daktilitas yang cukup? dan Kurva Kapasitas: Seberapa besar penurunan gaya geser dasar (*base shear*) saat kolom mengalami kegagalan terlebih dahulu.

Semua model tersebut menggunakan material baja *highly ductile member* (HDM) dengan dibuktikan pada pemeriksaan perhitungan berdasarkan pada SNI 7860:2020 dan dirancang menggunakan sistem SRPMK dengan dilakukan pemeriksaan syarat kekompakan sayap serta badan pada balok kolom berdasarkan SNI 7860:2020 Tabel D1.1. Kemudian dari keempat tipe model struktur tersebut dibandingkan guna mengetahui perilaku struktur baja tersebut beserta level kinerja pada saat dilakukan *pushover analysis*.

Struktur tangga dan struktur plat lantai tidak dimodelkan dalam MIDAS GEN 2024 dan pengaruhnya hanya diperhitungkan sebagai beban. Ketika pelat lantai tidak dimodelkan sebagai elemen struktural (*shell*), maka asumsi kekangan lateral kontinu pada sayap atas balok hilang. Akibatnya, panjang bentang tak terkekang (*L_b*) balok dihitung sebesar jarak antar tumpuan utama (node ke node). Hal ini sangat berpengaruh pada perhitungan *lateral torsional buckling* (LTB). Tanpa dukungan pelat, kapasitas momen balok akan turun karena nilai *L_b* yang besar mempercepat terjadinya tekuk sebelum balok mencapai kondisi plastisnya. Oleh karena itu, pemodelan ini menggunakan nilai *L_b* yang sesuai di desain.

Struktur yang didesain akan difungsikan sebagai kantor dan masuk ke dalam kategori risiko II. Data yang digunakan dalam pemodelan struktur bangunan menggunakan MIDAS GEN 2024, yaitu:

- Mutu Baja JIS G 3101 - SS 400 atau ASTM A36
- Luas bangunan adalah 40 m x 24 m dengan ketinggian lantai tipikal = 3,5 m
- Pembebanan yang dipakai dapat dilihat pada Tabel 1.
- Dimensi penampang profil baja kolom dapat dilihat pada Tabel 2.
- Dimensi penampang profil baja balok dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 1. Pembebanan yang dipakai (SNI 1727:2020 Tabel 4.3-1)

Tipe Beban	Nilai Beban (kN/m ²)
<i>Dead Load</i>	3,75
<i>Superimposed Dead Load</i>	1,44
<i>Live Load</i>	3,83
<i>Live Load Roof</i>	0,96
<i>Rain</i>	0,3

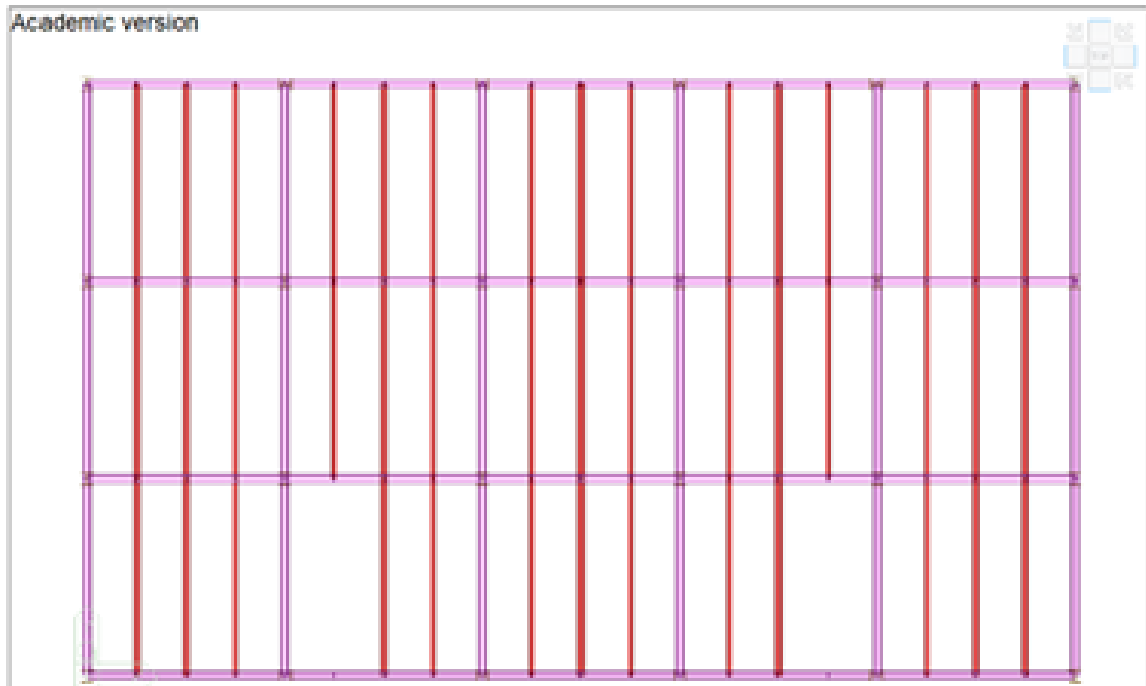
Tabel 2. Profil baja kolom

Tipe Model	Lantai	Dimensi
Model 1 & 2	dasar-5	HB.500X500X45X70
Model 3 & 4	dasar-5	HB.406X403X16X24

Tabel 3. Profil baja balok model 1 sampai model 4

Tipe Balok	Lantai	Dimensi
Balok Induk	dasar-5	WF.594X302X14X23
Balok Anak	dasar-5	WF.400X200X8X13

Model struktur dirancang dengan bantuan software MIDAS GEN 2024 dapat dilihat pada Gambar 2-4 mewakili model 2 dengan perletakan jepit serta tidak menampilkan pemodelan tangga dan plat lantai agar balok dan kolom terlihat lebih jelas serta pengaruhnya hanya diperhitungkan sebagai beban. Komponen struktur yang dimodelkan mencakup rangka momen khusus, rangka gravitasi, dan sistem diafragma. Diafragma dimodelkan sebagai *semi rigid* untuk mempertimbangkan kekakuan diafragma secara eksplisit sesuai ketentuan SNI 1726:2019. Perletakan kolom rangka momen khusus pada lantai dasar dimodelkan dengan perletakan jepit (Pusat Studi Gempa Nasional, 2024).



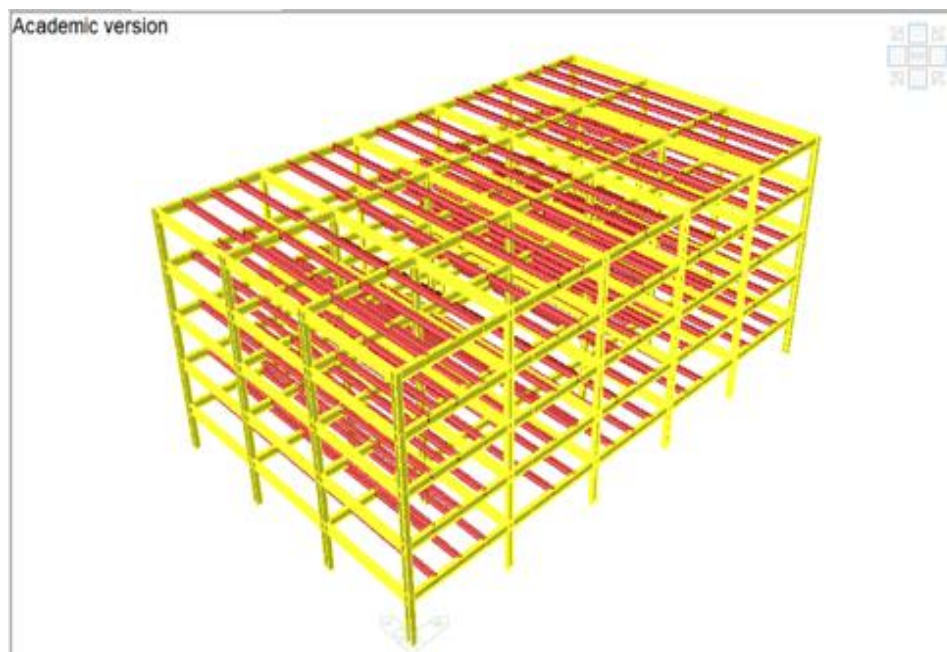
Gambar 2. Denah lantai tipikal



Gambar 3. Portal bangunan arah Y



Gambar 4. Portal bangunan arah X



Gambar 5. Pemodelan 3D SRPMK

Pada Gambar 5 pemodelan SRPMK atau portal penahan gempa ditandai dengan warna kuning pada profil balok induk dan kolom, sedangkan warna merah pada profil balok anak dirancang sebagai penahan gravitasi dan tidak menahan gempa.

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 7.9.1.1 “Analisis diizinkan untuk memasukkan jumlah ragam yang minimum untuk mencapai massa ragam terkombinasi paling sedikit 90 % dari massa aktual dalam masing-masing arah horizontal ortogonal dari respons yang ditinjau oleh model”. Model 1-4 telah dirancang dengan MIDAS GEN 2024 sesuai dengan definisi masing-masing model dapat dilihat pada Tabel 4-7 telah memenuhi persyaratan yang ditentukan dalam SNI 1726:2019 pasal 7.9.1.1.

Pemeriksaan profil baja WF dan HB pada balok & kolom SRPMK menggunakan HDM dapat diperoleh dari Persamaan 1-2 berdasarkan SNI 7860:2020.

Tabel 4. Modal *participation mass ratios* model 1

Mode	Periode <i>T(sec)</i>	Frequency <i>(cycle/sec)</i>	Sum UX (%)	Sum UY (%)
1	1,1147	0,8971	80,7407	0,0
2	0,8338	1,1993	0,0	80,3388
3	0,6968	1,4351	80,7676	0,0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10	0,1915	5,2206	93,0633	92,5936

Tabel 5. Modal *participation mass ratios* model 2

Mode	Periode <i>T(sec)</i>	Frequency <i>(cycle/sec)</i>	Sum UX (%)	Sum UY (%)
1	1,0544	0,9484	77,5099	0,0
2	0,8206	1,2185	0,0	79,3403
3	0,6905	1,4483	77,5431	0,0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10	0,1915	5,2208	90,3523	91,6725

Tabel 6. Modal *participation mass ratios* model 3

Mode	Periode <i>T(sec)</i>	Frequency <i>(cycle/sec)</i>	Sum UX (%)	Sum UY (%)
1	1,5386	0,6499	84,8618	0,0
2	1,1263	0,8878	0,0	84,3038
3	0,9319	1,0731	84,8888	0,0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10	0,2037	4,9088	98,4370	98,4232

Tabel 7. Modal *participation mass ratios* model 4

Mode	Periode <i>T(sec)</i>	Frequency <i>(cycle/sec)</i>	Sum UX (%)	Sum UY (%)
1	1,4795	0,6759	82,3795	0,0
2	1,1139	0,8978	0,0	83,5482
3	0,9259	1,0800	82,4102	0,0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10	0,2012	4,9708	97,1952	95,9081

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq 0,32 * \left(\frac{E}{F_y}\right)^{0,5} \quad (1)$$

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 2,57 * \left(\frac{E}{R_y * F_y}\right)^{0,5} * (1 - 1,04 * C_a) \quad (2)$$

dengan b_f = lebar sayap, t_f = tebal sayap, E = modulus elastisitas baja, (200.000 MPa), F_y = kuat leleh baja, h_w = tinggi efektif, t_w = tebal web, R_y = rasio kuat leleh terekspektasi terhadap kuat leleh minimum, C_a = rasio gaya aksial terfaktor terhadap kuat aksial terekspektasi.

Selanjutnya dilakukan pemeriksaan kekuatan penampang untuk memenuhi kriteria SNI 1729:2020 dan SNI 7860:2020, termasuk pemeriksaan SCWB perlu dipastikan bahwa rasio modulus penampang plastis kolom lebih besar 150% dibandingkan modulus penampang plastis balok.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Level kinerja struktur

Bedasarkan hasil evaluasi kinerja struktur dengan menggunakan *pushover analysis* menggunakan terhadap level intensitas gempa MCE pada model 1 dapat dilihat pada Tabel 8. Pada model 1 *performance point* terlihat di *step* 35 mencapai level kinerja *Immediate Occupancy - life safety* (IO-LS) untuk arah x dan di *step* 25 arah y mencapai level kinerja *Immediate Occupancy - life safety* (IO-LS).

Tabel 8. Level kinerja struktur model 1

Arah	Level gempa	Step	Level
x	MCE	35	IO-LS
y	MCE	25	IO-LS

Pada model 2 dapat dilihat pada Tabel 9 pencapaian level kinerja sama seperti pada model 1 sedangkan *performance point* terlihat di *step* 33 untuk arah x dan di *step* 24 untuk arah y.

Tabel 9. Level kinerja struktur model 2

Arah	Level gempa	Step	Level
x	MCE	33	IO-LS
y	MCE	24	IO-LS

Pada model 3 dapat dilihat pada Tabel 10 pada model 3 *performance point* terlihat di *step* 23 mencapai level kinerja melebihi *Collapse Prevention* (CP) untuk arah x dan di *step* 17 arah y mencapai level kinerja *Immediate Occupancy - life safety* (IO-LS).

Tabel 10. Level kinerja struktur model 3

Arah	Level gempa	Step	Level
x	MCE	23	>CP
y	MCE	17	IO-LS

Pada model 4 dapat dilihat pada Tabel 11 pada model 4 *performance point* terlihat di *step* 22 mencapai level kinerja *Immediate Occupancy - life safety* (IO-LS) untuk arah x dan di *step* 17 arah y mencapai level kinerja yang sama seperti arah x.

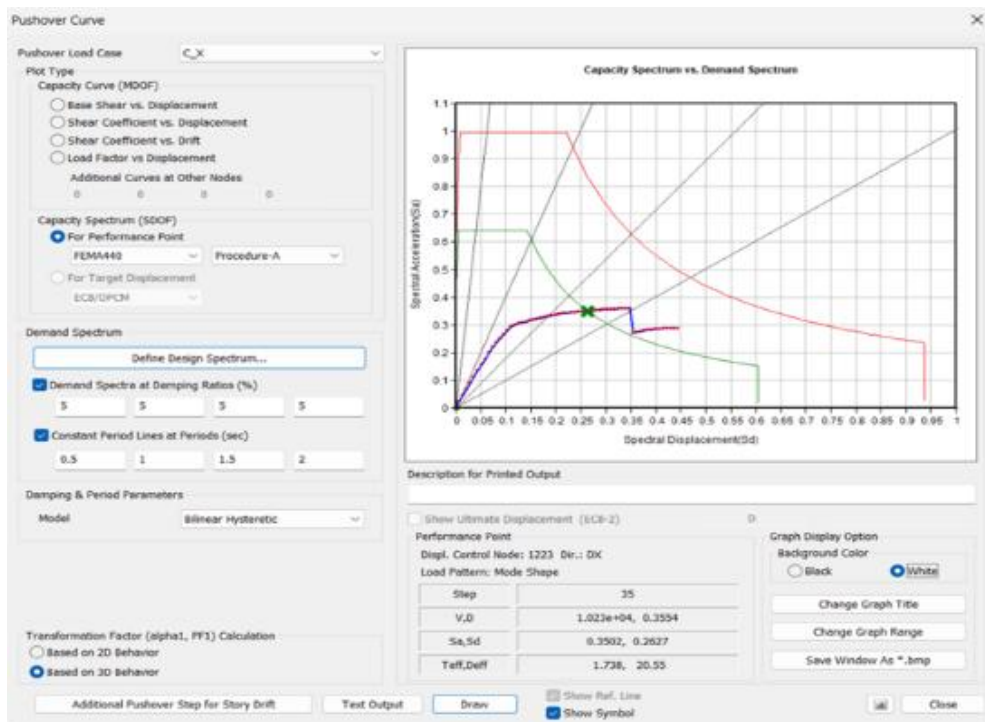
Tabel 11. Level kinerja struktur model 4

Arah	Level gempa	Step	Level
x	MCE	22	IO-LS
y	MCE	17	IO-LS

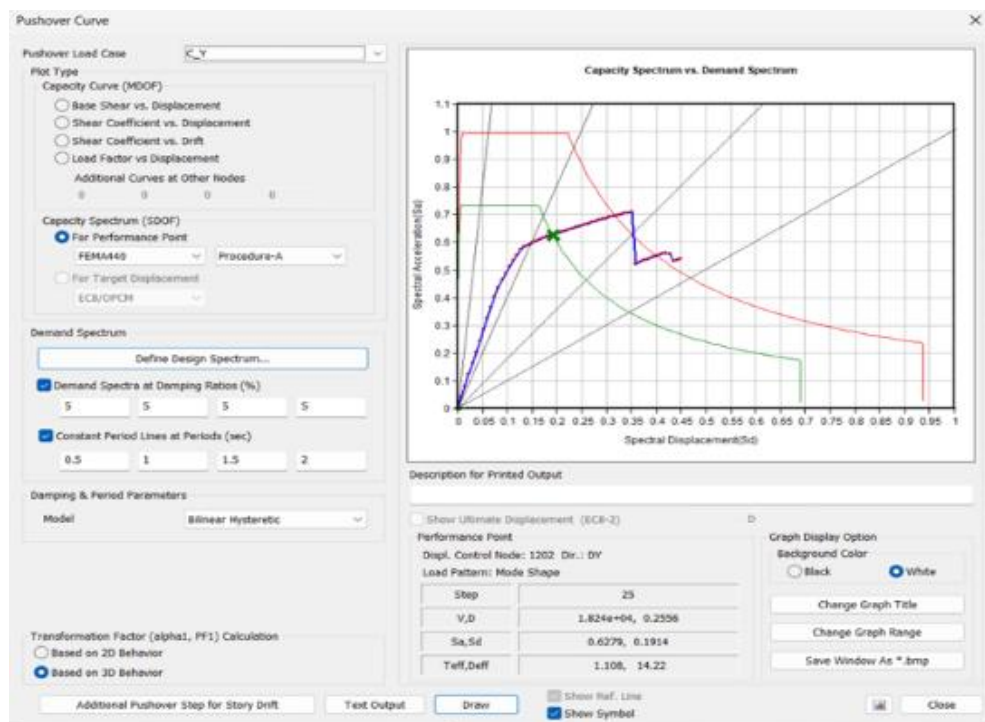
Performance point struktur

Evaluasi kinerja seismik Model 1 menggunakan CSM dapat dilihat pada Gambar - 7 serta Tabel 12 menghasilkan titik kinerja (*performance point*) yang menunjukkan respons struktur pada kondisi gempa desain. Titik Kinerja di kedua arah tercapai pada perpindahan yang sangat kecil yang berdasarkan kurva kapasitas keduanya masih berada di fase elastis awal di bawah titik leleh. Selain itu, parameter perpindahan efektif (D_{eff}) yang merupakan target perpindahan yang diharapkan menunjukkan bahwa perpindahan yang diizinkan untuk desain ini cukup besar dan perpindahan yang terjadi di titik kinerja (D) hanya merupakan fraksi kecil dari kapasitas deformasi total.

Untuk model 2 dapat dilihat pada Gambar 8-9 serta Tabel 13 menunjukkan bahwa struktur mencapai titik kinerja (*performance point*) pada kondisi yang relatif lebih aman dibandingkan dengan batas leleh. Melihat kurva kapasitas, perpindahan puncak yang terjadi di kedua arah masih berada di fase *linear* atau awal *non-linear* kurva mulai melengkung di sekitar $D = 0.3$ m. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kondisi gempa desain ini, model 2 masih mempertahankan kekakuan tinggi dan beroperasi dengan margin keamanan yang signifikan, jauh dari kondisi leleh utama (*yield point*) ataupun ambang keruntuhan.



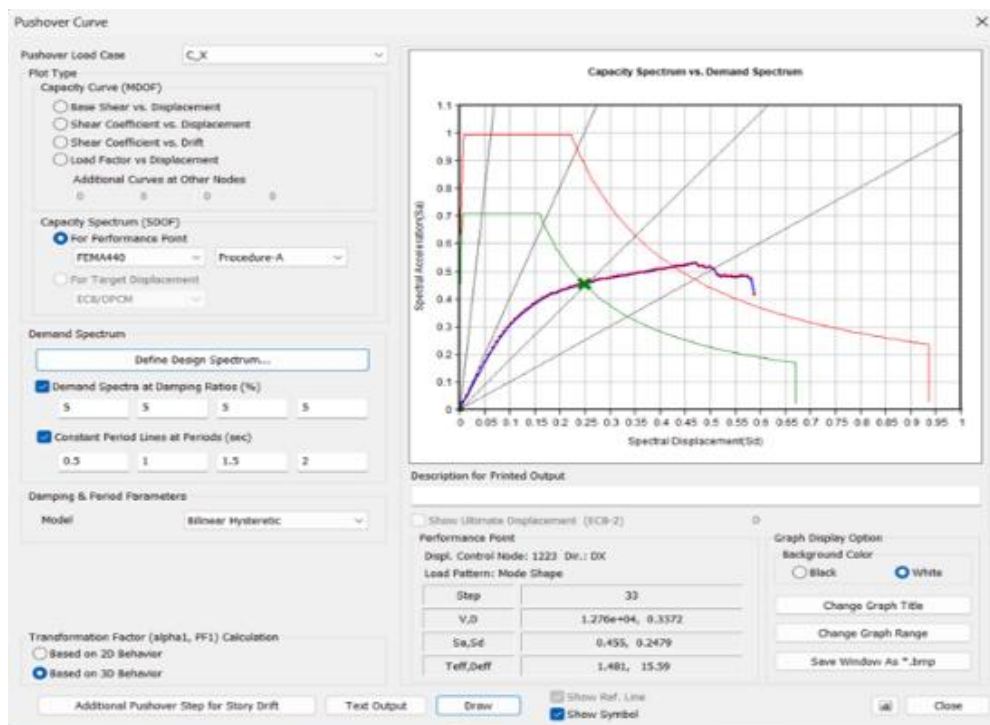
Gambar 6. Performance point model 1 arah x



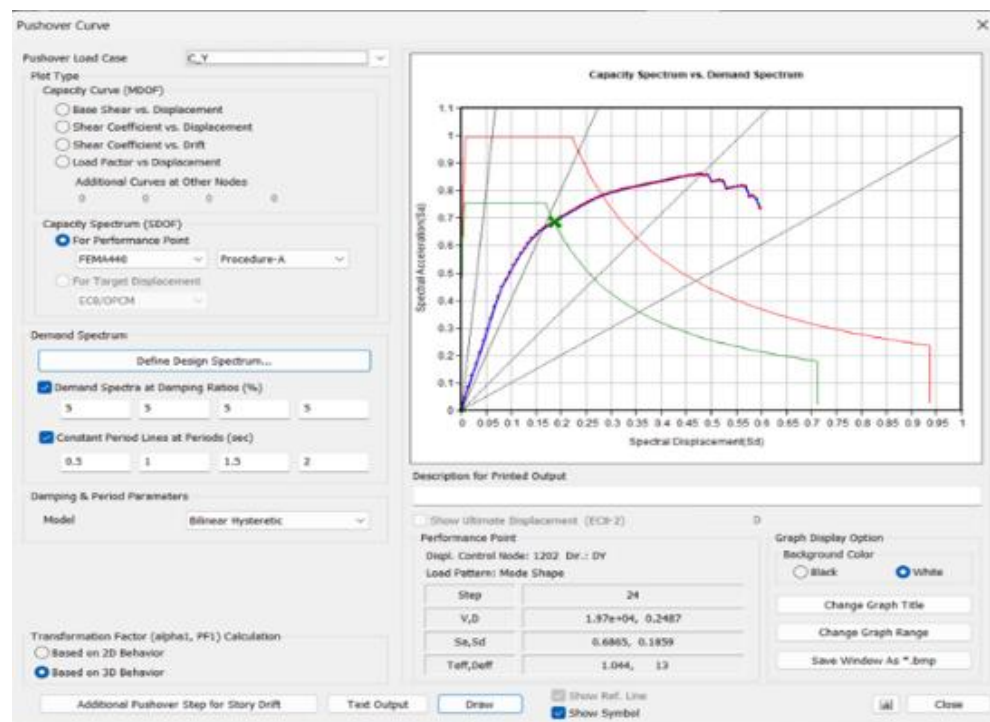
Gambar 7. Performance point model 1 arah y

Tabel 12. Performance point model 1

Arah	Gaya geser desain	Gaya geser	D	S _a	S _d	T _{eff}	D _{eff}
x	2.979,98 kN	1,023x10 ⁴ kN	0,35 m	0,35 g	0,26 g	1,73 s	20,55 m
y	2.765,06 kN	1,824x10 ⁴ kN	0,25 m	0,62 g	0,19 g	1,10 s	14,22 m



Gambar 8. Performance point model 2 arah x

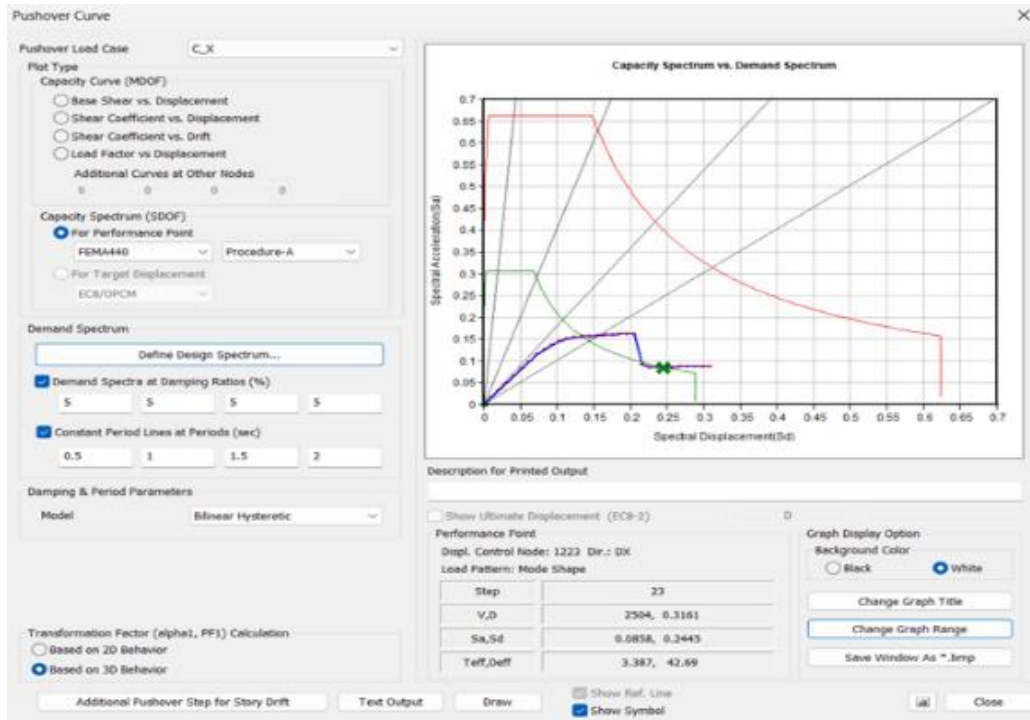


Gambar 9. Performance point model 2 arah y

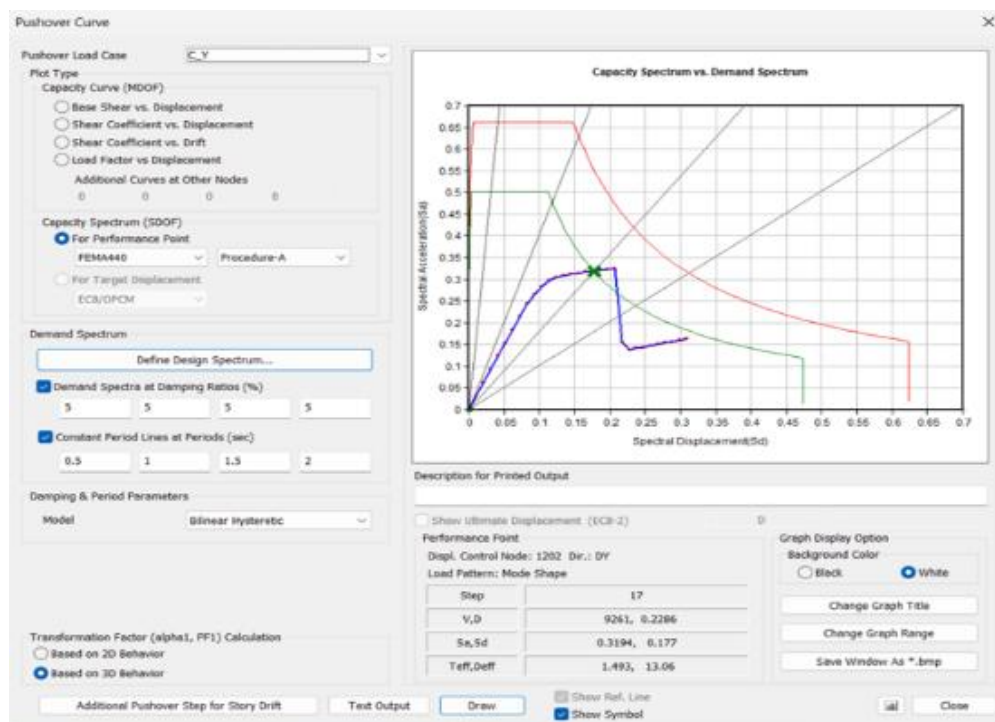
Tabel 13. Performance point model 2

Arah	Gaya geser desain	Gaya geser	D	S _a	S _d	T _{eff}	D _{eff}
x	2.979,98 kN	1,276x10 ⁴ kN	0,33 m	0,45 g	0,24 g	1,48 s	15,59 m
y	2.765,06 kN	1,970x10 ⁴ kN	0,24 m	0,68 g	0,18 g	1,04 s	13 m

Untuk model 3 dapat dilihat pada Gambar 10-11 serta Tabel 14 menunjukkan bahwa struktur arah y berperilaku mendekati batas elastis, sedangkan arah x telah terdeformasi hingga mencapai batas leleh, periode efektif yang memanjang drastis dan rendahnya gaya geser yang ditahan. Hal ini menunjukkan bahwa model 3 di arah x memerlukan perbaikan signifikan untuk memenuhi kriteria kinerja *Immediate Occupancy* (IO) atau *Life Safety* (LS) karena telah terjadi inisiasi kerusakan plastis.



Gambar 9. Performance point model 3 arah x

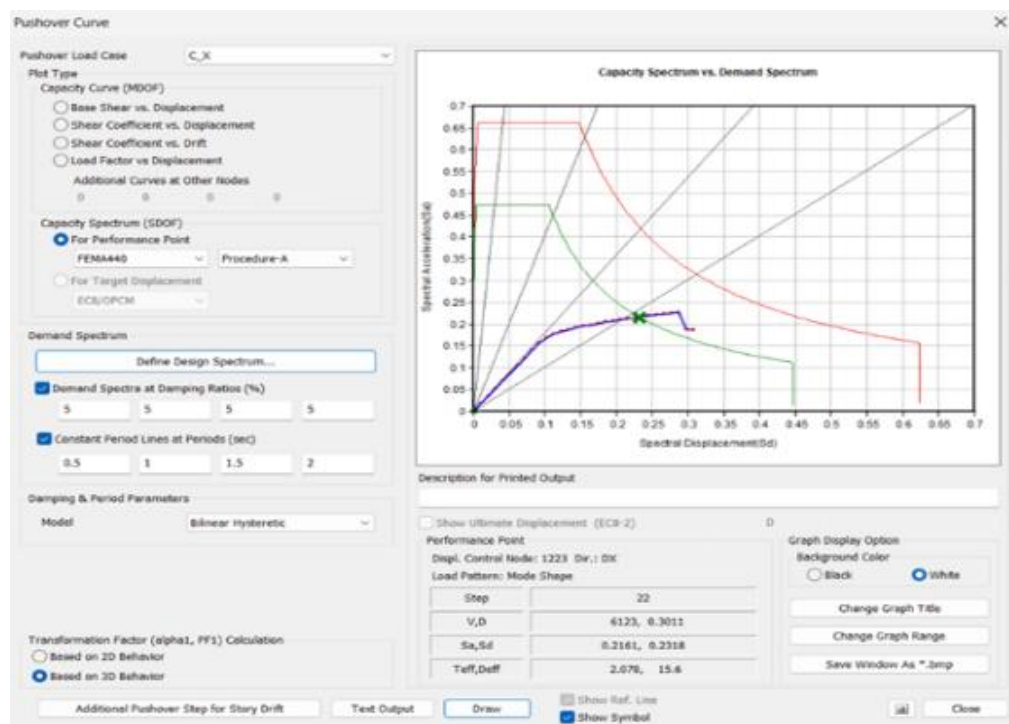


Gambar 10. Performance point model 3 arah y

Tabel 14. *Performance point* model 3

Arah	Gaya geser desain	Gaya geser	D	S _a	S _d	T _{eff}	D _{eff}
x	2.979,98 kN	2504 kN	0,31 m	0,08 g	0,24 g	3,38 s	42,69 m
y	2.765,06 kN	9261 kN	0,22 m	0,31 g	0,17 g	1,49 s	13,06 m

Untuk model 4 dapat dilihat pada Gambar 12-13 serta Tabel 15 secara keseluruhan, model 4 berhasil menahan gaya geser yang tinggi di arah y menunjukkan kapasitas yang baik. Namun, kinerja di arah x menunjukkan bahwa struktur baru saja memulai inisiasi kerusakan plastis pada gempa desain yang menandakan bahwa model 4 berada di batas kriteria kinerja *Immediate Occupancy* (IO) di arah x tetapi masih memiliki kinerja yang sangat baik di arah y.



Gambar 11. *Performance point* model 4 arah x

Secara keseluruhan model 2 menunjukkan mempertahankan kinerja elastis, kekuatan yang tinggi, keseimbangan terbaik antara kekakuan dan kapasitas tertinggi menjadikannya pilihan desain yang paling efisien dan aman.

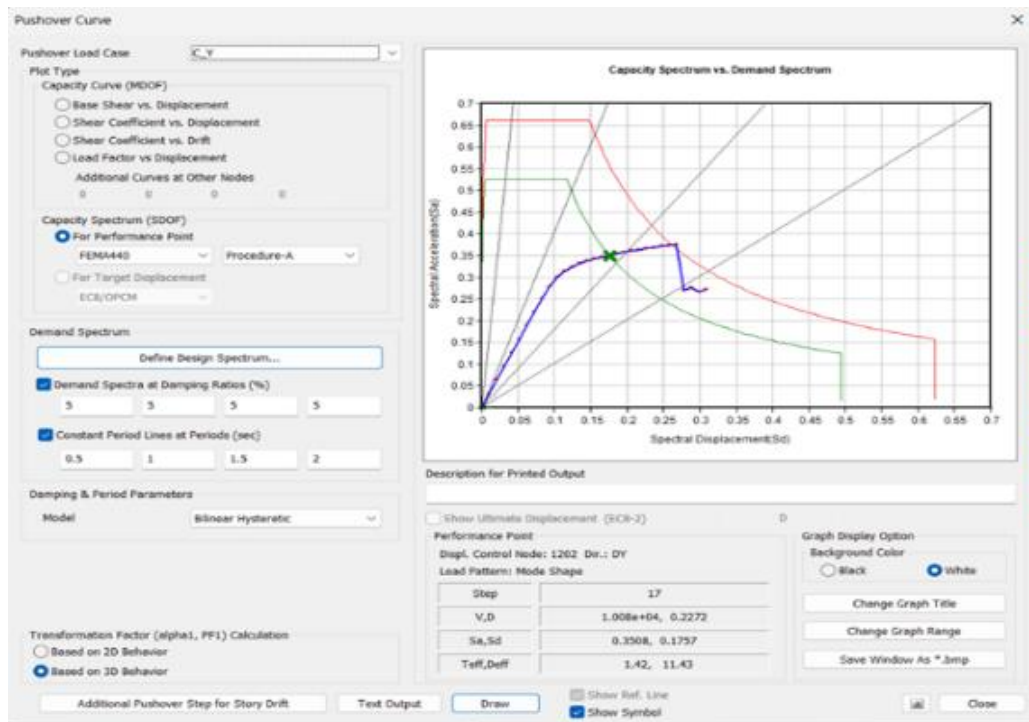
Pola runtuh struktur

Pola keruntuhan pada model 1 dapat dilihat pada Tabel 16 menguraikan kinerja struktur di bawah beban gempa dalam arah x dan arah y. Hasil ini menunjukkan bahwa model 1 dirancang memenuhi konsep SCWB, pelelehan awal (sendi plastis) terjadi pada balok sebelum kolom, sebuah mekanisme yang diinginkan untuk memastikan daktilitas dan mencegah keruntuhan kolom yang mendadak.

Untuk model 2 dapat dilihat pada Tabel 17 hasil ini menegaskan bahwa model 1 maupun model 2 dirancang untuk mengikuti prinsip kolom kuat balok lemah (*Strong Column Weak Beam*). Mekanisme ini memastikan bahwa kegagalan daktil pembenturan sendi plastis terjadi terlebih dahulu pada balok, memungkinkan struktur untuk menyerap energi gempa dan mencegah keruntuhan kolom yang lebih kritis dan getas.

Untuk model 3 dapat dilihat pada Tabel 18 menunjukkan pola keruntuhan yang kurang ideal berdasarkan standar desain struktur daktil. Keruntuhan model 3 yang diawali pada kolom (*Weak Column Strong Beam*) menunjukkan risiko keruntuhan lantai atau struktur secara keseluruhan yang lebih tinggi dan kurang daktil.

Untuk model 4 dapat dilihat pada Tabel 19 menunjukkan pola keruntuhan yang kurang diinginkan karena sendi plastis pertama terjadi pada kolom di kedua arah. Mekanisme ini dikenal sebagai *Weak Column Strong Beam*, meningkatkan risiko kegagalan kolom dan keruntuhan tingkat (*storey collapse*) yang lebih getas dan fatal.



Gambar 12. Performance point model 4 arah

Tabel 15. Performance point model 4

Arah	Gaya geser desain	Gaya geser	D	S _a	S _d	T _{eff}	D _{eff}
x	2.979,98 kN	6123 kN	0,30 m	0,21 g	0,23 g	2,07 s	15,60 m
y	2.765,06 kN	1,008x10 ⁴ kN	0,22 m	0,35 g	0,17 g	1,42 s	11,43 m

Tabel 16. Pola runtuh model 1

Arah	V _(desain)	V _(yield)	Sendi Plastis Pertama
x	2.979,98 kN	6.434,48 kN	Balok
y	2.765,06 kN	11.702,10 kN	Balok

Tabel 17. Pola runtuh model 2

Arah	V _(desain)	V _(yield)	Sendi Plastis Pertama
x	2.979,98 kN	6.201,60 kN	Balok
y	2.765,06 kN	11.879,60 kN	Balok

Tabel 18. Pola runtuh model 3

Arah	V _(desain)	V _(yield)	Sendi Plastis Pertama
x	2.979,98 kN	3.674,64 kN	Kolom
y	2.765,06 kN	7.071,04 kN	Kolom

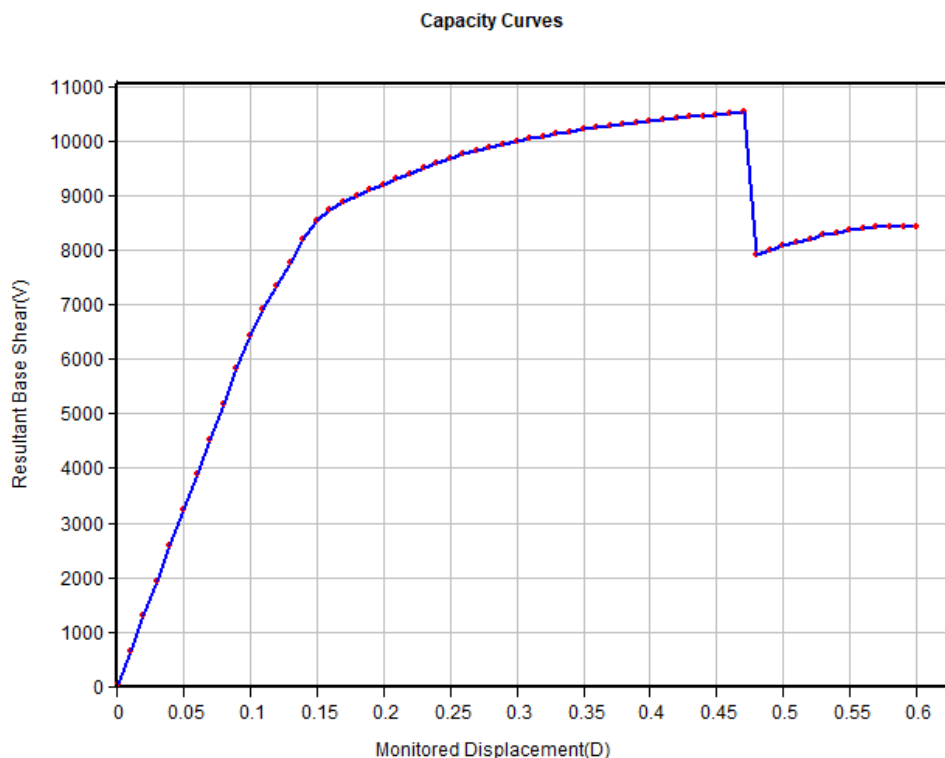
Tabel 19. Pola runtuh model 4

Arah	V _(desain)	V _(yield)	Sendi Plastis Pertama
x	2.979,98 kN	4.439,29 kN	Kolom
y	2.765,06 kN	7.985,07 kN	Kolom

Secara keseluruhan model 1 dan model 2 menunjukkan kinerja daktilitas yang *superior*. Sedangkan model 3 dan model 4 memerlukan evaluasi lebih lanjut terkait keamanan dan ketahanan gempa jangka panjang.

Kurva kapasitas struktur

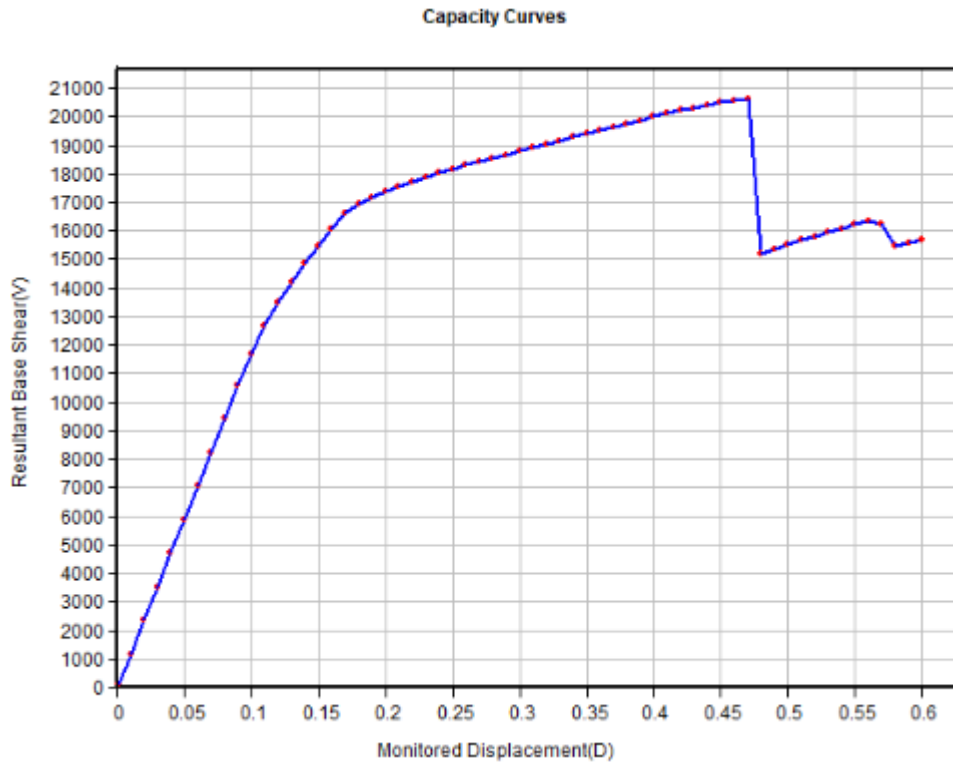
Dari hasil *pushover analysis* pada model 1 dapat dilihat pada Gambar 14-15 serta Tabel 20 Model tersebut memiliki kekuatan dan daktilitas yang jauh lebih superior pada arah y dibandingkan arah x yang ditandai dengan $V_{(max)}$, daktilitas perpindahan ($\mu\Delta$), dan Ω_0 yang semuanya hampir dua kali lipat lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa struktur tersebut sangat tidak seimbang dalam merespons beban lateral gempa di kedua arah utama. Analisis kapasitas model 1 menunjukkan perbedaan kinerja yang sangat signifikan antara arah horizontal x dan y mengindikasikan struktur yang tidak seimbang dalam merespons beban lateral gempa. Model 1 menunjukkan kinerja yang sangat baik dan daktilitas secara keseluruhan terutama pada arah y. Namun, ketidakseimbangan yang ekstrem ini kinerja arah y dua kali lipat lebih baik daripada arah x tidak ideal untuk desain struktur tahan gempa. Dalam desain optimal kinerja struktur kekuatan dan daktilitas seharusnya sedekat mungkin untuk kedua arah utama.



Gambar 13. Kurva kapasitas model 1 arah x

Pada model 2 dapat dilihat pada Gambar 16-17 serta Tabel 21 model tersebut memiliki struktur yang sangat kuat dan sangat daktil dengan kemampuan deformasi *ultimate* yang lebih besar ($\delta_{(max)}$) dibandingkan model 1. Namun, sama seperti model 1, model 2 menunjukkan ketidakseimbangan kinerja yang jelas. Arah y memiliki kekuatan ($V_{(max)}$) dan daktilitas ($\mu\Delta$) yang jauh lebih tinggi dibandingkan arah x. Meskipun kedua arah aman, perbedaan signifikan ini menunjukkan bahwa struktur tersebut tidak optimal dalam alokasi kekuatan dan kekakuannya. Model 2 adalah peningkatan kinerja yang substansial di semua aspek dibandingkan model 1. Model 2 menghasilkan kekuatan, daktilitas, dan margin keamanan yang lebih tinggi. Meskipun demikian, kedua model memiliki masalah yang sama yaitu respons lateral yang sangat tidak seimbang dengan kinerja di arah y jauh melampaui arah x.

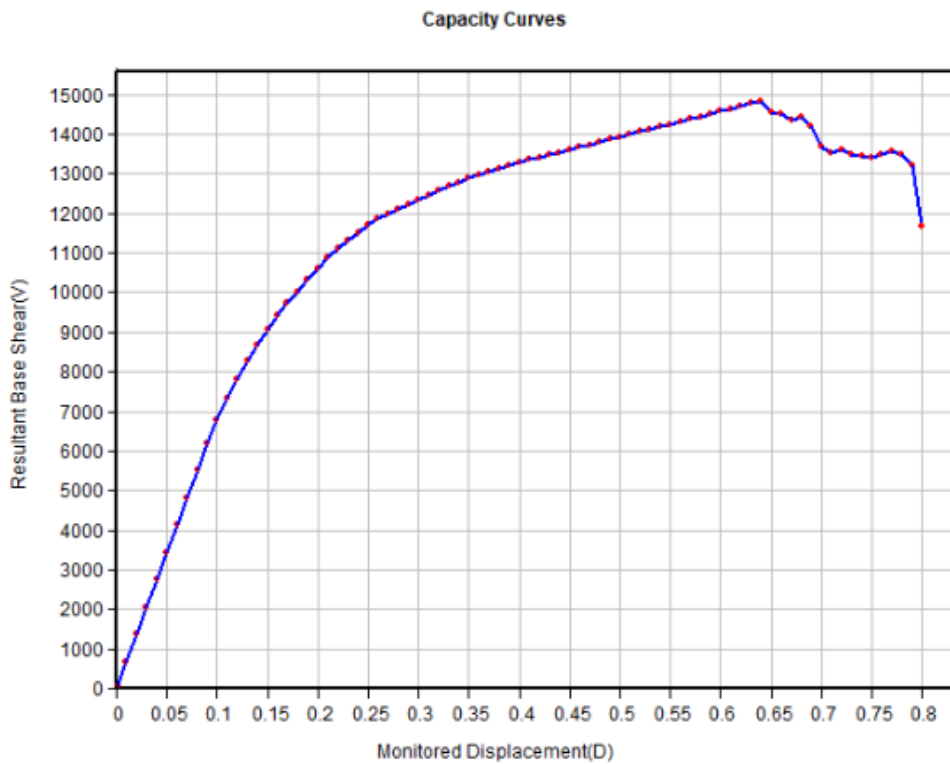
Pada model 3 dapat dilihat pada Gambar 18-19 serta Tabel 22 model tersebut memiliki kekuatan, daktilitas, dan margin keamanan terendah. Hasil menunjukkan kinerja yang getas (*brittle*) dan tidak aman untuk menahan beban gempa desain. Perpindahan desain ($\delta_{(desain)}$) lebih besar sebesar di arah x dibandingkan model lain. Namun, perpindahan maksimum ($\delta_{(max)}$) yang sangat kecil menunjukkan kegagalan mencapai deformasi *ultimate* yang memadai. Hal ini mengindikasikan bahwa struktur ini sangat kaku tetapi sangat getas yang merupakan kombinasi berbahaya dalam desain tahan gempa.



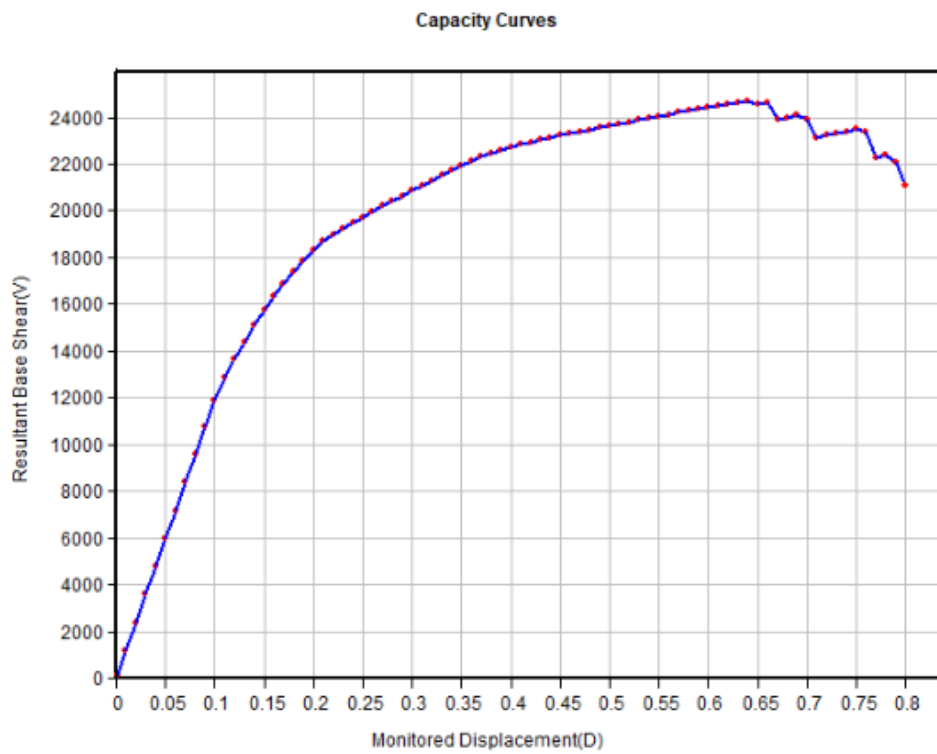
Gambar 14. Kurva kapasitas model 1 arah y

Tabel 20. Kurva kapasitas model 1

Arah	$V_{(desain)}$	$V_{(max)}$	$\delta_{(desain)}$	$\delta_{(max)}$	$\mu\Delta$	Ω_0
x	2.979,98 kN	10.519,70 kN	0,05 m	0,47 m	9,40	3,53
y	2.765,06 kN	20.629,20 kN	0,02 m	0,47 m	23,50	7,46



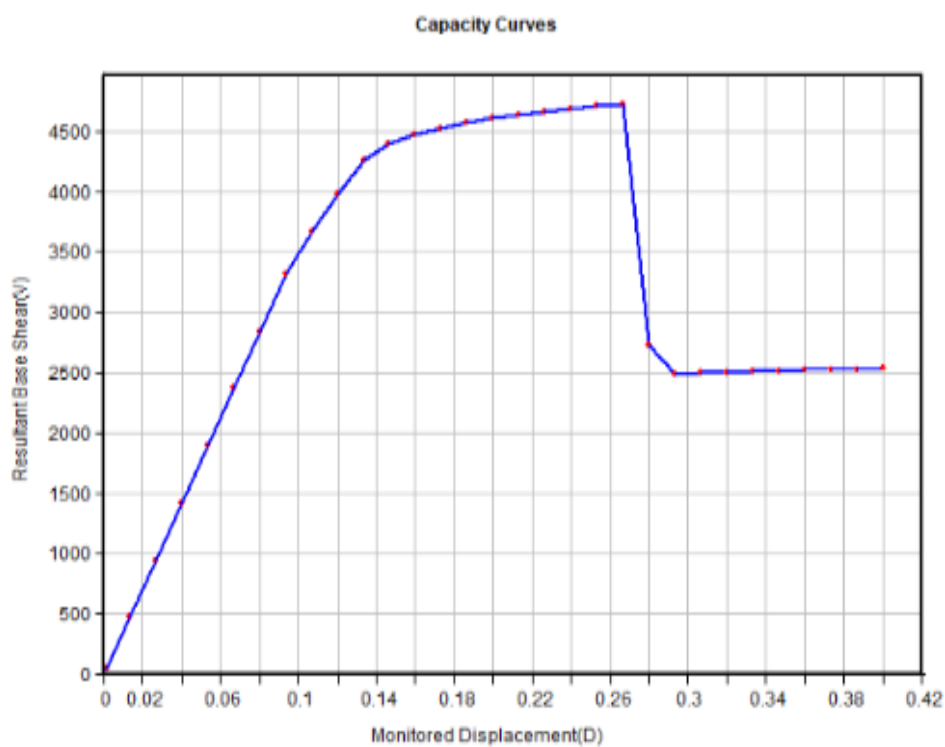
Gambar 15. Kurva kapasitas model 2 arah x



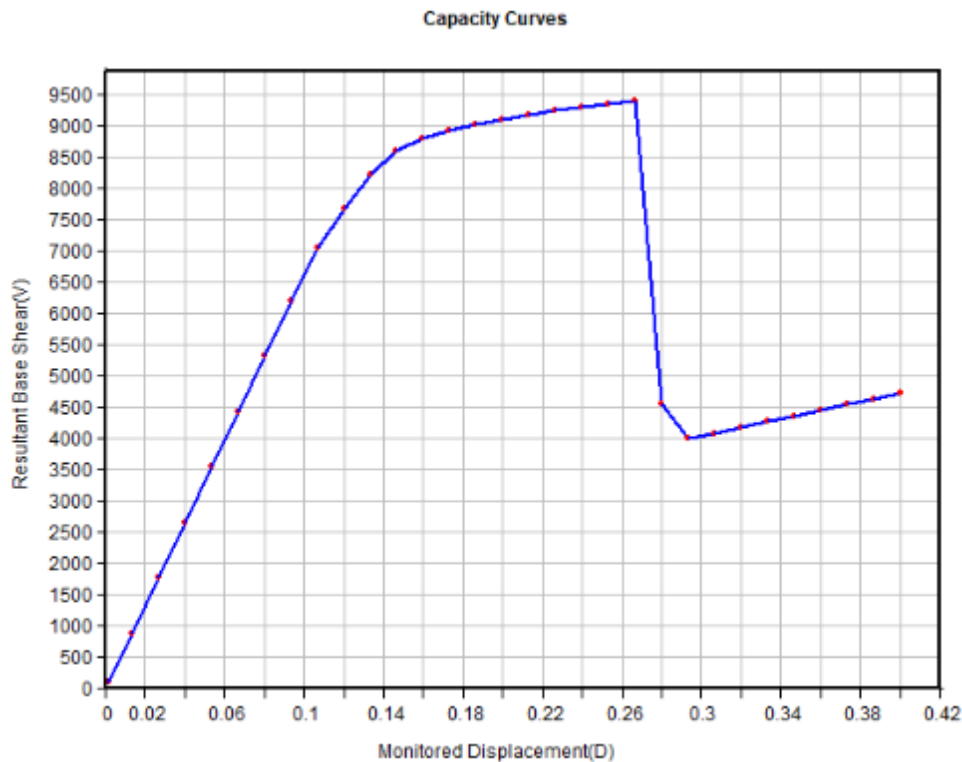
Gambar 16. Kurva kapasitas model 2 arah y

Tabel 21. Kurva kapasitas model 2

Arah	$V_{(desain)}$	$V_{(max)}$	$\delta_{(desain)}$	$\delta_{(max)}$	$\mu\Delta$	Ω_0
x	2.979,98 kN	14.838,20 kN	0,05 m	0,64 m	12,80	4,97
y	2.765,06 kN	24.707,20 kN	0,03 m	0,64 m	21,33	8,94



Gambar 17. Kurva kapasitas model 3 arah x



Gambar 18. Kurva kapasitas model 3 arah

Tabel 22. Kurva kapasitas model 3

Arah	$V_{(desain)}$	$V_{(max)}$	$\delta_{(desain)}$	$\delta_{(max)}$	$\mu\Delta$	Ω_0
x	2.979,98 kN	4.727,51 kN	0,09 m	0,27 m	2,85	1,58
y	2.765,06 kN	9.416,38 kN	0,05 m	0,27 m	5,00	3,40

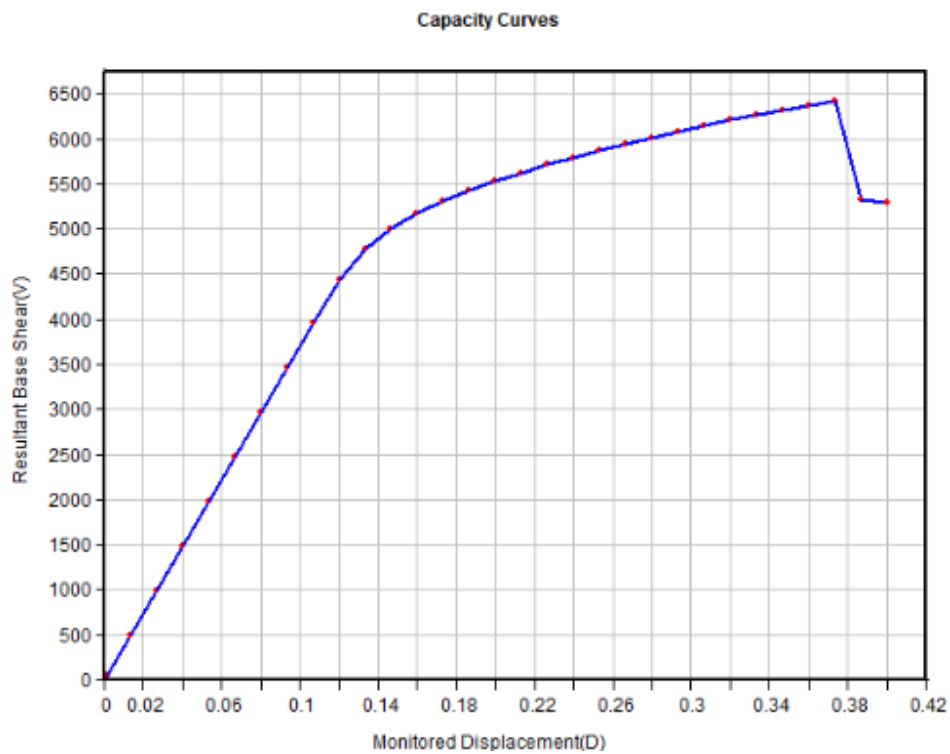
Pada model 4 dapat dilihat pada Gambar 20-21 serta Tabel 23 model tersebut menunjukkan kinerja yang kurang duktail dan memiliki margin keamanan yang rendah. Model 4 menghasilkan Ω_0 sangat rendah dan tidak memenuhi target keamanan untuk sistem tahan gempa.

Semua model memiliki masalah struktural yang sama dimana kinerja arah y jauh lebih baik hampir dua kali lipat daripada arah x dalam hal kekuatan, duktilitas, dan overstrength.

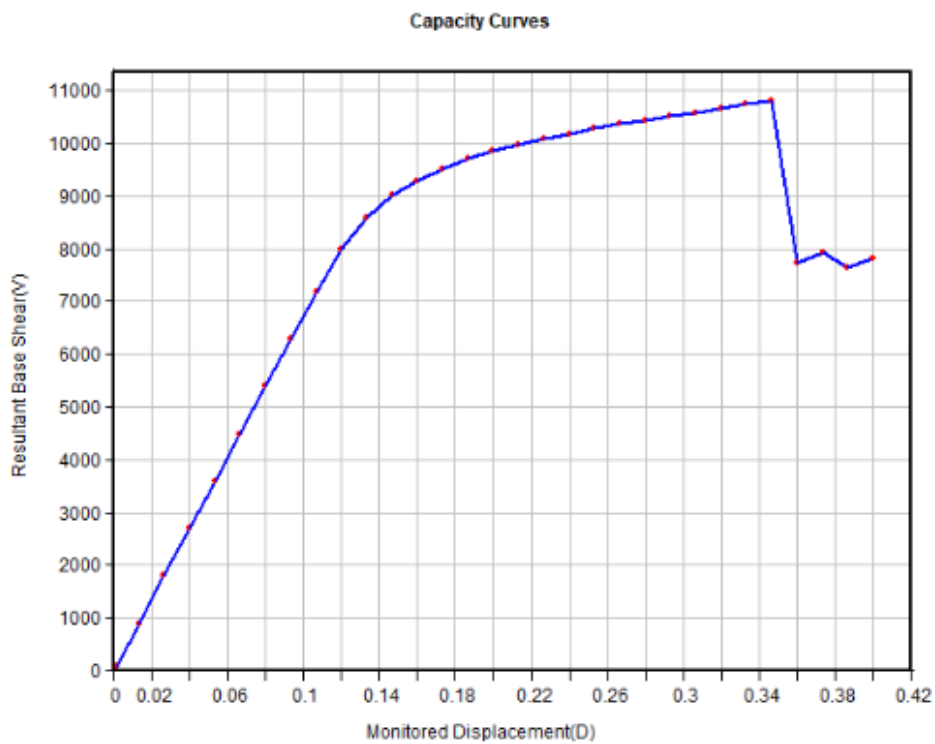
4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dari *pushover analysis* dari keempat model tersebut dapat diambil kesimpulan beberapa hal sebagai berikut:

1. Kinerja struktur pada model 1 dan model 2 dievaluasi menggunakan level gempa MCE berada pada kategori IO-LS. Level kinerja ini belum mencapai maupun melewati level maksimal kriteria BSE-2N pada ASCE 41-17 adalah berada pada kategori CP.
2. Kinerja struktur pada model 3 dan model 4 dievaluasi menggunakan level gempa MCE berada pada kategori >CP untuk arah x dan berada pada kategori IO-LS untuk arah y. Level kinerja pada arah y belum mencapai maupun melewati level maksimal kriteria BSE-2N pada ASCE 41-17 adalah berada pada kategori CP. Sedangkan pada arah x mencapai kriteria BSE-2N.
3. Berdasarkan perpindahan yang dicapai $D \leq 0,23$ m yang jauh di bawah ambang leleh yang terlihat pada kurva kapasitas umum $D = 0,3$ model 2 beroperasi di fase elastis awal pada gempa desain. Namun, dengan T_{eff} yang lebih pendek dan kapasitas geser yang lebih tinggi, model 2 dapat dinilai memiliki kinerja struktural yang lebih baik karena mampu menahan gaya gempa yang lebih besar serta membatasi perpindahan struktur secara lebih efektif.
4. Gaya geser dasar yang dihasilkan pada model 2 menjadi yang tertinggi dibandingkan dengan model yang lainnya. Untuk arah x didapat nilai gaya geser dasar sebesar 19.291,83 kN dan arah y sebesar 31.381,98 kN. Model 2 dinilai desain yang paling aman dan paling tahan gempa.



Gambar 19. Kurva kapasitas model 4 arah x



Gambar 20. Kurva kapasitas model 4 arah y

Tabel 23. Kurva kapasitas model 4

Arah	$V_{(desain)}$	$V_{(max)}$	$\delta_{(desain)}$	$\delta_{(max)}$	$\mu\Delta$	Ω_0
x	2.979,98 kN	6.424,07 kN	0,09 m	0,37 m	4,00	2,15
y	2.765,06 kN	10.810,10 kN	0,05 m	0,35 m	6,50	3,90

5. Gaya geser dasar yang dihasilkan pada saat kondisi leleh pada model 1 memiliki gaya geser dasar tertinggi untuk arah y sebesar 5.834,8 kN dan pada model 2 memiliki gaya geser dasar tertinggi untuk arah y sebesar 10.738,9 kN. Model 1 maupun Model 2 dirancang untuk mengikuti prinsip kolom kuat balok lemah (*Strong Column Weak Beam*). Mekanisme ini memastikan bahwa kegagalan daktail pembentukan sendi plastis terjadi terlebih dahulu pada balok, memungkinkan struktur untuk menyerap energi gempa dan mencegah keruntuhan kolom yang lebih kritis dan getas.
6. Nilai Ω_0 dari hasil *pushover analysis* model 1 dan model 2 lebih besar daripada yang tercantum pada SNI 1726:2019. Sedangkan, model 3 dan model 4 untuk arah x memiliki nilai Ω_0 lebih kecil dari yang tercantum pada SNI 1726:2019 sebaliknya untuk arah y. Perbedaan sistem perletakan dan penampang profil baja memenuhi SCWB berpengaruh signifikan terhadap perolehan nilai Ω_0 hasil *pushover analysis*.
7. Berdasarkan evaluasi kinerja struktur menggunakan CSM yang telah dilakukan bahwa model 2 adalah pilihan desain terbaik karena menghasilkan kekuatan, daktilitas, dan margin keamanan tertinggi, serta mematuhi prinsip SCWB.

DAFTAR PUSTAKA

- Amhudo, R. L., & Utomo, D. P. (2024). Design of dormitory structure with steel special moment frames. *Journal of Civil Engineering and Infrastructure Technology*, 3(1), 67–76.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung* (SNI 1726:2019).
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain* (SNI 1727:2020).
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural* (SNI 1729:2020).
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *Ketentuan seismic untuk bangunan gedung baja structural* (SNI 7860:2020).
- Federal Emergency Management Agency (2005). *Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures* (FEMA 440).
- Prabowo, A., Nam, J. H., & Wijaya, U. (2025). Evaluasi kinerja sistem struktur rangka pemikul momen khusus pada gedung baja dengan variasi pemodelan sendi plastis. *Jurnal Teknik Sipil ITB*, 32(2), 199-208.
- Prasetyo, T. A., dan Yasir, N. (2024). *Perencanaan struktur baja bangunan bertingkat, special moment frames dan sambungan terpraktualifikasi* (Jilid 3). PT Nas Media Indonesia.
- Pusat Studi Gempa Nasional. (2024). *Aplikasi perencanaan bangunan gedung bertingkat tinggi tahan gempa berdasarkan SNI 1726:2019*. Kementerian Pekerjaan Umum.
- Rasuna, T. Y. (2025). Studi pemodelan struktur baja SRPMK 10 lantai dengan panel zone di Kota Medan (zona gempa Indonesia). *PORTAL: Jurnal Teknik Sipil*, 17(2), 6-14.
- Zachari, M. Y., & Turuallo, G. (2020). Analisis struktur baja tahan gempa dengan sistem SRPMK (struktur rangka pemikul momen khusus) berdasarkan SNI 1729:2015 dan SNI 1726:2012. *Rekonstruksi Tadukalo: Civil Engineering Journal on Research and Development*, 1(2), 9-16.

