

EFEK VARIASI PERILAKU SENDI PLASTIS PADA ANALISIS *PUSHOVER* SISTEM RBKK TIPE *INVERTED-V*

Hanavi Siahaan¹ dan Andy Prabowo^{1*}

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

Masuk: 20-11-2025, revisi: 02-12-2025, diterima untuk diterbitkan: 21-01-2026

ABSTRACT

The study was conducted on a six story plus an additional roof level of Special Concentrically Braced Frame (SCBF) steel structure. The lateral force resisting system consists of inverted-V bracing arranged as single-bay frames along each building perimeter. Variable of this study is the location of plastic hinges. In model 1, deformation controlled plastic hinges are assigned to the bracing, while force controlled plastic hinges are assigned to the columns and beams. In model 2, deformation controlled plastic hinges are assigned to columns, beams, and bracing. Structural evaluation was performed using pushover analysis by ETABS. The results show that hinge location variations have minimal influence on the performance point and ductility parameters (R , Ω_0 , dan C_d). The average differences in base shear dan displacement at the performance point between model 1 dan model 2 are 0.51% and 0.56% respectively. The differences in ductility parameters for model 1 and model 2 are 1%, 0%, 1.4% in the x direction and 1%, 0%, 1% in the y direction for R , Ω_0 , dan C_d respectively. However, it significantly affects the plastic hinge mechanism and performance level. The first component to exceed >CP level in model 2 is the bracing, whereas in model 1 it is the beams. The performance targets for model 2 at the MCE hazard level is LS for both directions but the performance targets for model 1 at the MCE hazard level are LS in the x direction and CP in the y direction. Overall, model 1 exhibits poorer structural performance level.

Keywords: SCBF; pushover; force controlled; deformation controlled

ABSTRAK

Penelitian dilakukan pada struktur rangka baja terbreis konsentris khusus (RBKK), 6 lantai ditambah atap. Struktur penahan beban lateral berupa rangka baja dengan breis tipe V-terbalik (*inverted-V*) yang terdiri dari 1 bentang *frame* terletak di masing-masing perimeter bangunan. Variasi penelitian pada lokasi sendi plastis yaitu untuk model 1 lokasi sendi plastis *deformation controlled* ada di breis sedangkan *force controlled* ada di kolom dan balok sedangkan untuk model 2 lokasi sendi plastis *deformation controlled* ada di ketiga komponen struktur (kolom, balok, dan breis). Evaluasi struktur dilakukan menggunakan analisis *pushover* dengan bantuan program ETABS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan variasi lokasi sendi plastis tidak memberikan banyak pengaruh terhadap *performance point* maupun nilai parameter daktilitas struktur (R , Ω_0 , dan C_d). Perbedaan rata-rata gaya geser dan deformasi pada *performance point* untuk model 1 dan model 2 berturut-turut adalah 0,51% dan 0,56%, sedangkan perbedaan nilai parameter daktilitas struktur antara model 1 dan model 2 untuk R , Ω_0 , dan C_d adalah 1%, 0%, 1,4% untuk arah x dan 1%, 0%, 1% untuk arah y. Namun, variasi pemodelan berpengaruh terhadap mekanisme sendi plastis dan target kinerja struktur. Komponen yang lebih dulu mencapai level >CP pada model 2 adalah breis sedangkan pada model 1 adalah balok. Target kinerja struktur di model 2 pada level gempa MCE adalah LS untuk arah x dan y. Target kinerja struktur di model 1 pada level gempa MCE adalah LS untuk arah x dan CP untuk arah y. Model 1 memberikan hasil kinerja yang lebih buruk.

Kata kunci: RBKK; pushover; force controlled; deformation controlled

1. PENDAHULUAN

Material utama yang paling sering digunakan pada konstruksi bangunan tahan gempa di Indonesia adalah beton dan baja. Berdasarkan parameter kekuatan, kekakuan, dan daktilitas, konstruksi baja masih lebih unggul dibandingkan dengan konstruksi beton (Ilham, 2020). Menurut SNI 1726:2019 umumnya sistem rangka baja penahan gempa terdiri dari dua yaitu sistem rangka pemikul momen (RPM) dan sistem rangka breis. Sistem rangka breis terbagi menjadi dua, yaitu rangka breis konsentris (RBK) dan rangka breis eksentris (RBE). Penggunaan breis pada sistem RBK memberikan hasil peningkatan yang signifikan terhadap kekakuan strukturnya, namun penyerapan energi lateral pada sistem ini kurang memadai (Alhussein et al., 2024; Benita et al., 2019). Sedangkan sistem RBE merupakan sistem rangka baja dengan kekakuan elastis yang sangat baik dan juga daktilitas yang baik (Saloma et al., 2017). Meskipun

demikian RBK masih memiliki keunggulan lain dibandingkan dengan RBE diantaranya lebih mudah dan cepat dalam pengerjaan terutama pada bagian sambungan breis.

Tingkat kinerja struktur tahan gempa dapat dievaluasi salah satunya dengan analisis *pushover*. Analisis *pushover* dilakukan dengan cara memberikan pola beban statik tertentu dengan arah lateral yang besarnya ditingkatkan secara bertahap sampai struktur tersebut mencapai target *displacement* tertentu atau mencapai pola keruntuhan tertentu (Hilma & Anzhari, 2021). Selain daripada pola beban dorong, pemodelan sendi plastis juga merupakan salah satu parameter penting dalam analisis *pushover*. Perilaku sendi contohnya dalam program ETABS terdiri dari dua yaitu *force controlled (brittle)* dan *deformation controlled (ductile)*. Perilaku *force controlled* ditentukan terhadap *demand to capacity ratio (D/C)* dalam bentuk besaran gaya, sedangkan *deformation controlled* ditentukan terhadap *demand to capacity ratio (D/C)* dalam bentuk besaran deformasi. Penentuan tipe dan lokasi sendi plastis ini dapat menginterpretasikan perilaku struktur yang berbeda. Ahmed et al. (2022) membandingkan pengaruh properti sendi plastis dari ASCE 41-13 dengan sendi plastis hasil perhitungan dari *output* SAP2000. Hasil penelitian tersebut menunjukkan balok mencapai level *collapse prevention* pada model dengan sendi plastis dari *output* SAP2000 selain itu energi yang diserap pada model tersebut lebih kecil 27% dibandingkan model dengan sendi plastis dari ASCE 41-13. Prabowo et al. (2025) meneliti gedung baja SRPMK 5 lantai dengan variasi sendi plastis *deformation controlled* dan *force controlled* di kolom. Hasil penelitian menunjukkan nilai faktor kuat lebih (Ω_0) pada model dengan sendi plastis *deformation controlled* lebih besar daripada model dengan *force controlled* selain itu tingkat kinerja pada model dengan *force controlled* memberikan hasil lebih tinggi dari batas target kinerja baik pada level gempa DBE (*design basis earthquake*) maupun MCE (*maximum considered earthquake*).

ASCE 41-17 memberikan kemungkinan untuk tipe dan lokasi sendi plastis terjadi yaitu untuk struktur baja rangka terbreis konsentris khusus (RBKK), sendi plastis *deformation controlled* terjadi di breis dan untuk sendi plastis *force controlled* terjadi di kolom dan balok. Penelitian ini mencoba untuk tidak mengikuti kemungkinan dari ASCE 41-17 tersebut dengan memvariasikan lokasi sendi plastis *deformation controlled* yang awalnya hanya di breis, di penelitian ini diletakan juga ke kolom dan balok. Analisis dilakukan pada struktur baja RBKK dengan breis tipe V-terbalik menggunakan analisis *pushover* yang dibantu program ETABS 22.4.0. Level gempa yang dipakai adalah DBE dan MCE dan metode analisis yang digunakan adalah metode CSM (*capacity spectrum method*) (FEMA 440, 2005) dan DCM (*displacement coefficient method*) (ASCE 41, 2017). Tujuan penelitian adalah membandingkan kinerja struktur bangunan RBKK terhadap variasi lokasi sendi plastis.

2. METODE PENELITIAN

Pengumpulan data

Sistem struktur adalah RBKK tipe V-terbalik, berlokasi di Jakarta dan fungsi bangunan adalah kantor. Bangunan memiliki dimensi 30 m x 18 m, total 6 lantai ditambah atap, dan tinggi antar lantai adalah 4 m sehingga total ketinggian struktur adalah 24 m. Material baja yang digunakan adalah dengan tegangan ultimit (F_u) 540 MPa dan tegangan leleh (F_y) 270 MPa, sedangkan beton dengan kuat tekan (f'_c) 25 MPa. Pembebanan mengikuti SNI 1727:2020 seperti dalam Tabel 1, dan parameter respon spektrum mengacu pada SNI 1726:2019 seperti dalam Tabel 2 dan Gambar 1. Redundansi menggunakan 1,3 karena sistem penahan gaya lateral hanya terdiri dari 1 bentang. Denah dan potongan bangunan bisa dilihat di Gambar 2-4.

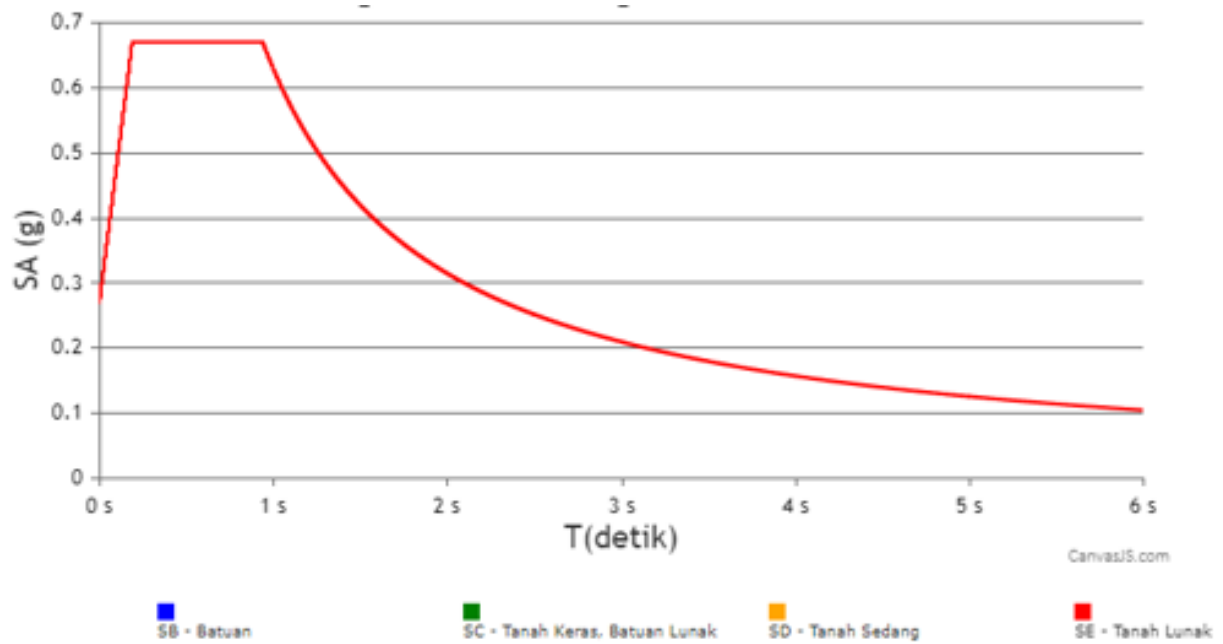
Tabel 1. Pembebanan *gravity*

	Beban mati (kg/m ²)	Beban hidup (kg/m ²)
Lantai tipikal	288	245
Lantai atap	137	100

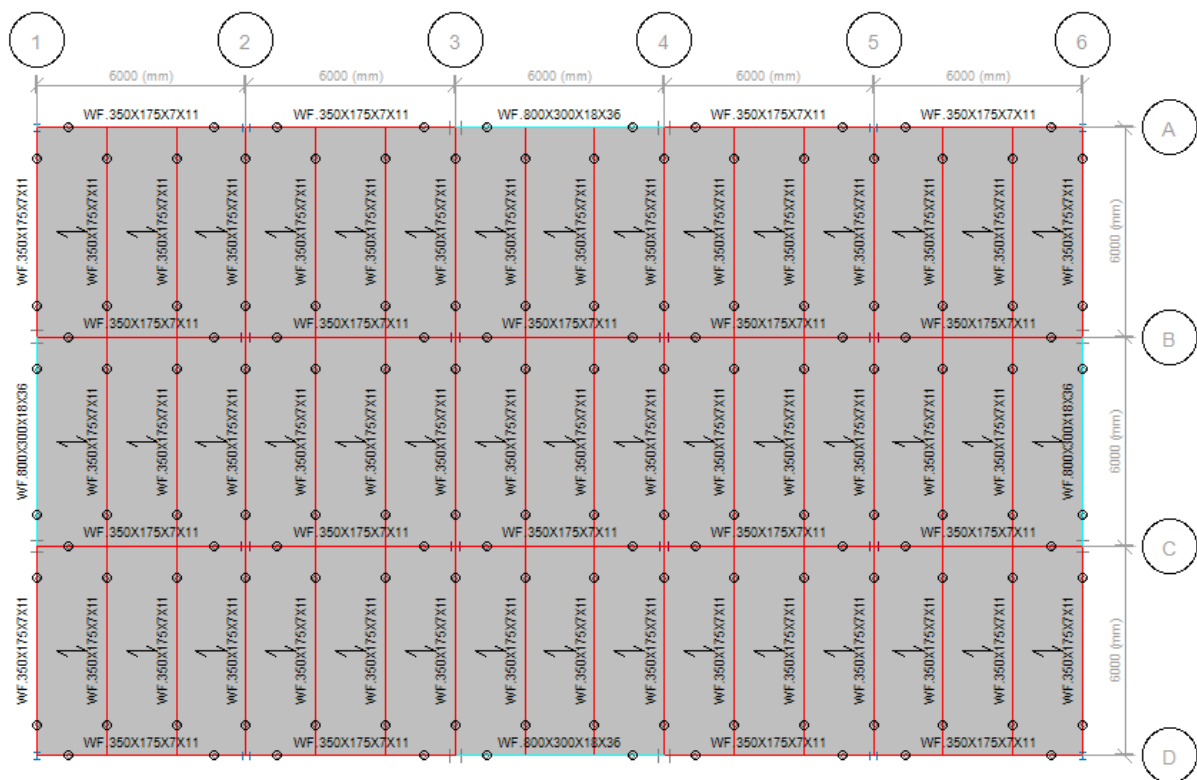
Tabel 2. Parameter respon spektrum

S_s	S_1	S_{ds}	S_{d1}
0,7806	0,3823	0,67	0,63

Rangkuman dimensi penampang dapat dilihat dari Tabel 3.



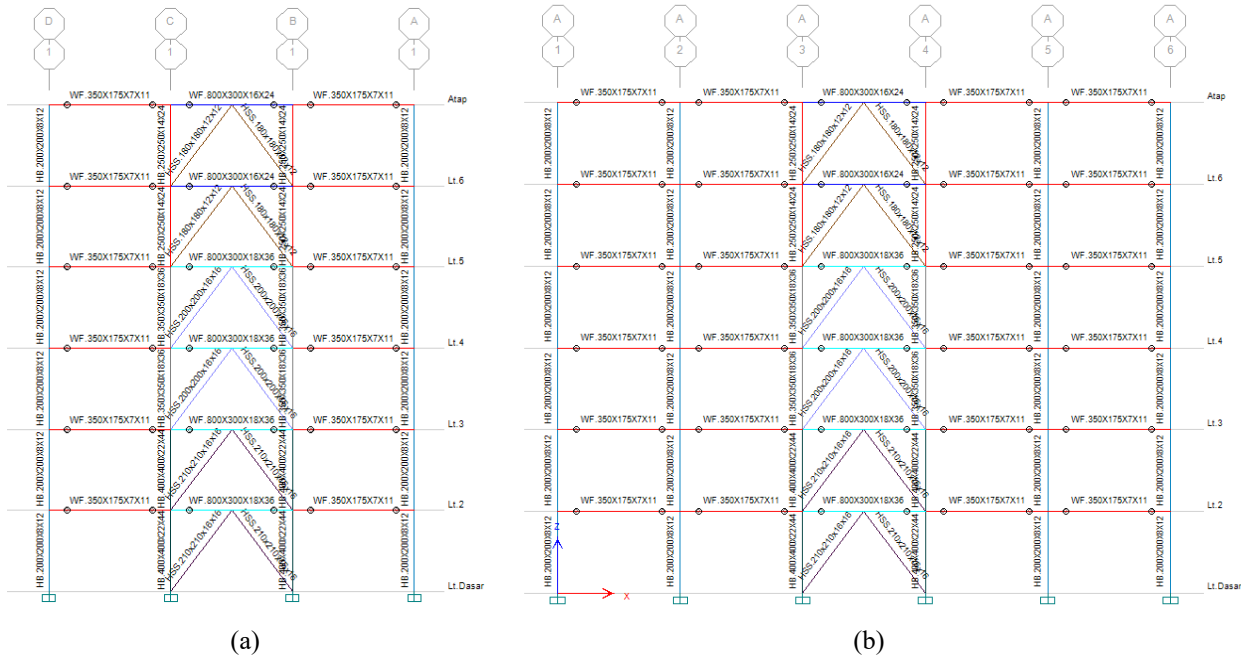
Gambar 1. Kurva respon spektrum (tanah lunak, Jakarta)



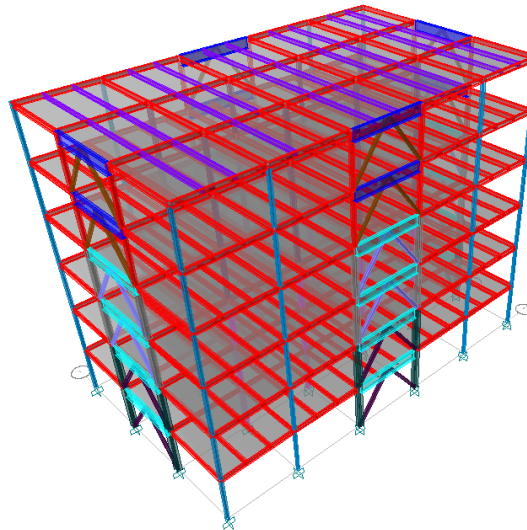
Gambar 2. Denah titpikal bangunan

Analisis struktur

Setelah semua data dimasukkan dan struktur selesai dimodelkan program dijalankan untuk analisis. Kemudian dilanjutkan dengan memeriksa *mode shape* bangunan. Menurut ASCE 7-22 bab 12.9.1.1 total *modal mass participation* minimal adalah 90% untuk masing-masing arah ortogonal. Selain itu untuk bangunan yang regular *mode shape* pertama dan kedua (arah x atau y) sebaiknya didominasi dengan translasi seperti analogi pendulum sederhana. Apabila syarat-syarat ini belum terpenuhi sebaiknya model struktur dimodifikasi.



Gambar 3. Potongan AS perimeter bangunan arah pendek (a) dan arah memanjang (b)



Gambar 4. Model 3D bangunan

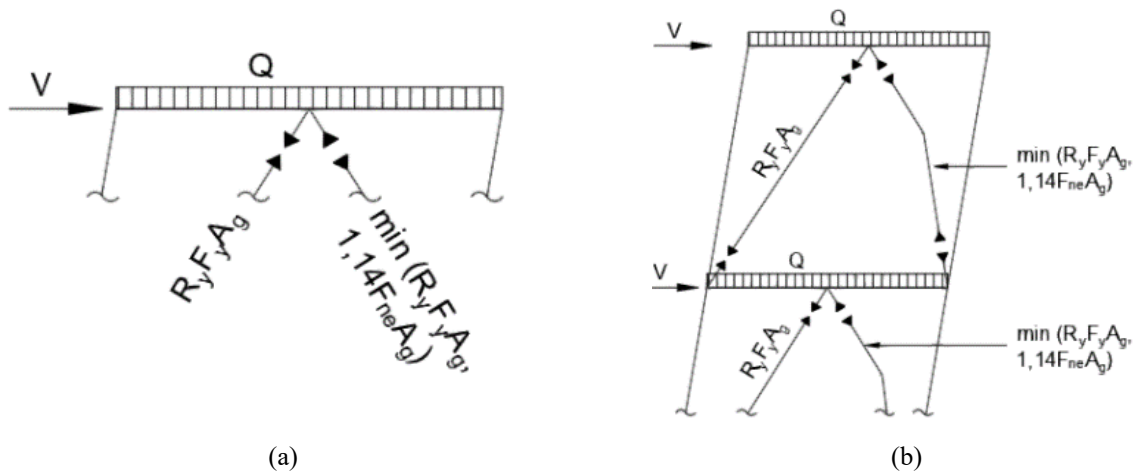
Setelah itu, dilakukan analisis beban gempa yaitu membandingkan gaya geser dasar hasil analisis dinamik (respon spektrum) dari ETABS dengan perhitungan gaya geser dasar dari statik ekuivalen. Apabila hasil dari analisis dinamik lebih besar maka tidak ada perubahan pada model, tetapi jika hasil dari statik ekuivalen lebih besar maka rasio antara gaya geser statik ekuivalen dengan gaya geser analisis dinamik harus dikalikan dengan faktor skala dari masing-masing *load case* beban gempa.

Desain kapasitas

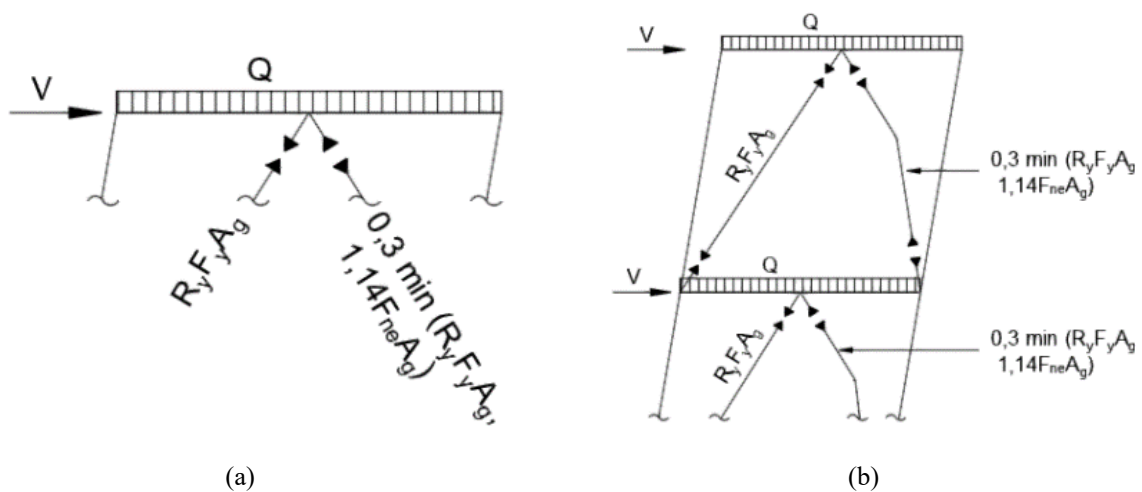
Analisis dilanjutkan dengan desain komponen struktur RBKK yaitu untuk balok dan kolom harus didesain sesuai kapasitas dari breis sesuai AISC 341 (2022), ilustrasi desain kapasitas dapat dilihat pada Gambar 5-6, dengan menggunakan Persamaan 1-3. Setelah semua terpenuhi selanjutnya struktur harus diperiksa terhadap pengaruh P delta, *interstory drift*, dan ketidakberaturan sesuai dengan SNI 1726:2019. Akhir dari langkah ini adalah struktur selesai didesain sesuai *code* dan berikutnya dapat dilakukan analisis *pushover*.

Tabel 3. Dimensi penampang

Elemen struktur	Lantai	Profil penampang (mm)	Asal penampang
Kolom perimeter	1 – 6	HB 200x200x8x12	GYS
Kolom tengah	1 – 3	HB 300x300x10x15	GYS
	4 – 6	HB 250x250x9x14	GYS
Kolom RBKK	1 – 2	HB 400x400x22x44	Built-up
	3 – 4	HB 350x350x18x36	Built-up
	5 – 6	HB 250x250x14x24	Built-up
Balok perimeter	2 – atap	WF 350x175x7x11	GYS
Balok tengah (induk)	2 – atap	WF 350x175x7x11	GYS
Balok anak	2 – 6	WF 350x175x7x11	GYS
	atap	WF 300x150x6,5x9	GYS
Balok RBKK	2 – 5	WF 800x300x18x36	Built-up
	6 – atap	WF 800x300x16x24	Built-up
Breis RBKK	1 – 2	HSS 210x210x16x16	Built-up
	3 – 4	HSS 200x200x16x16	Built-up
	5 – 6	HSS 180x180x12x12	Built-up



Gambar 5. Desain kapasitas untuk balok (a) dan kolom (b) kondisi breis mengalami tarik dan tekan



Gambar 6. Desain kapasitas untuk balok (a) dan kolom (b) kondisi breis mengalami tarik dan pasca tekuk

Kekuatan tarik breis terekspektasi:

$$R_y F_y A_g \quad (1)$$

Kekuatan tekan breis terekspektasi:

$$\min \left(R_y F_y A_g, \frac{1}{0,877} F_{ne} A_g \right) \quad (2)$$

Kekuatan pasca tekuk breis terekspektasi:

$$0,3 \left(\min \left(R_y F_y A_g, \frac{1}{0,877} F_{ne} A_g \right) \right) \quad (3)$$

Dengan R_y = rasio tegangan leleh terekspektasi terhadap tegangan leleh minimum terspesifikasi (F_y) sesuai AISC 341:2022 (MPa), A_g = luas kotor area (mm^2), dan F_{ne} = tegangan nominal (MPa) dari bab E AISC 360:2022 dengan mengganti F_y dengan tegangan leleh terekspektasi $R_y F_y$.

Analisis *pushover*

Model *pushover* perlu dibuat terpisah dari model desain sebelumnya, dan terdiri dari 2 model berbeda sesuai dengan variasi lokasi sendi plastis. *Material property* dan *load case* pada kedua model masih sama. Material properti perlu dibuat 2 tipe (Sungkana et al., 2025), yang pertama adalah nilai F_y dan F_u sesuai kekuatan terspesifikasi dan yang kedua adalah sesuai kekuatan terekspektasi. Kekuatan terspesifikasi dipakai pada komponen struktur dengan sendi plastis tipe *force controlled* sedangkan kekuatan terekspektasi dipakai pada komponen struktur dengan sendi plastis tipe *deformation controlled*. *Load case* pertama dimasukan sebagai kondisi awal struktur yaitu hanya pengaruh dari beban gravitasi. Lalu *load case* kedua dan ketiga masing-masing adalah pola beban lateral untuk arah x dan y. Pola beban lateral pada penelitian ini adalah beban lateral dengan distribusi vertikalnya sebanding dengan bentuk arah ragam getar yang sedang ditinjau, seperti juga ditemukan pada studi Boenyamin et al. (2025).

Sendi plastis pada model 1 mengikuti Tabel 4 yang bersumber dari ASCE 41-17, yaitu untuk *deformation controlled* akibat P (aksial) lokasinya di breis, untuk *force controlled* akibat P (aksial) lokasinya di kolom, dan *force controlled* akibat M3 (momen) lokasinya di balok, karena pada balok gaya dominan dari M3. Sendi plastis model 2 yaitu untuk *deformation controlled* akibat M3 (momen) dipindah ke balok dan *deformation controlled* akibat P (aksial) dipindah ke kolom sedangkan pada breis masih sama seperti model 1 yaitu *deformation controlled* akibat P (aksial). Variasi sendi plastis model 1 dan model 2 dapat dilihat pada Tabel 5. Posisi sendi plastis pada breis dan balok ada di tengah bentang sedangkan pada kolom ada di ujung-ujung kolom.

Tabel 4. Contoh lokasi sendi plastis pada struktur rangka breis (ASCE 41-17)

Sistem struktur	Komponen struktur	<i>Deformation controlled action</i>	<i>Force controlled action</i>
Rangka breis	Breis	P (aksial)	-
	Balok	-	P
	Kolom	-	P
	<i>Shear link</i>	V (geser)	P, M (momen)

Tabel 5. Variasi sendi plastis model 1 dan model 2

Sistem struktur	Komponen struktur	Model 1		Model 2	
		<i>Deformation controlled action</i>	<i>Force controlled action</i>	<i>Deformation controlled action</i>	<i>Force controlled action</i>
Rangka breis	Breis	P (aksial)	-	P (aksial)	-
	Balok	-	M3 (momen)	M3 (momen)	-
	Kolom	-	P	P	-

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemeriksaan distribusi gaya lateral

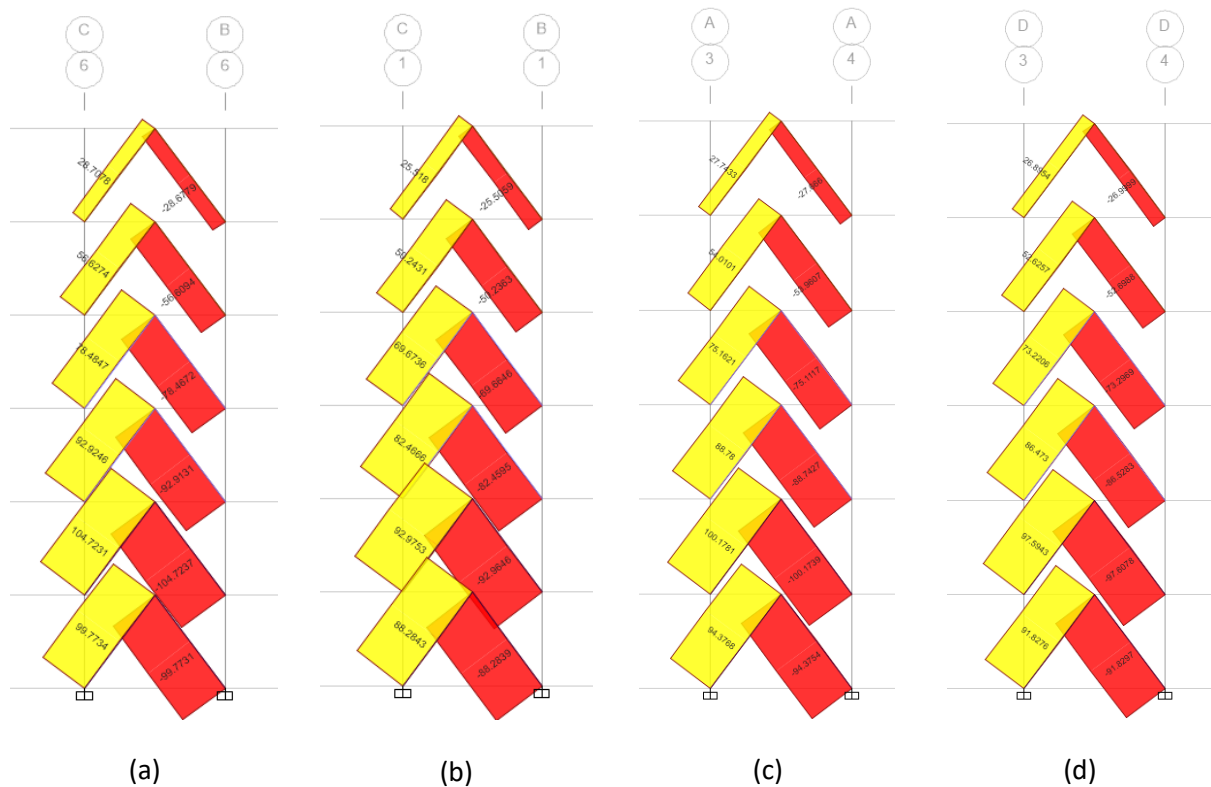
Pemeriksaan distribusi gaya lateral pada breis dilakukan dengan cara melihat hasil gaya dalam aksial breis terhadap beban gempa. Gaya pada masing-masing breis dalam kondisi tekan (C) atau tarik (T) harus terdistribusi minimal 30% dan kondisi lainnya tidak lebih dari 70% sesuai AISC 341 (2022). Hasil pemeriksaan distribusi gaya lateral pada masing-masing breis dapat dilihat dari Tabel 6-7 dan Gambar 7.

Tabel 6. Rasio distribusi gaya lateral breis *frame* AS 6 dan AS 1

Lantai	Breis RBKK <i>Frame</i> AS 6					Breis RBKK <i>Frame</i> AS 1				
	Ey		θ (deg)	Rasio	Ket	Ey		θ (deg)	Rasio	Ket
	T (ton)	C (ton)				T (ton)	C (ton)			
6	28,7078	28,6779	53,1301	0,500261	Ok	25,518	25,5059	53,1301	0,500119	Ok
5	56,6274	56,6094	53,1301	0,500079	Ok	50,2431	50,2363	53,1301	0,500034	Ok
4	78,4847	78,4672	53,1301	0,500056	Ok	69,6736	69,6646	53,1301	0,500032	Ok
3	92,9246	92,9131	53,1301	0,500031	Ok	82,4666	82,4595	53,1301	0,500022	Ok
2	104,7231	104,7237	53,1301	0,499999	Ok	92,9753	92,9646	53,1301	0,500029	Ok
1	99,7734	99,7731	53,1301	0,500001	Ok	88,2843	88,2839	53,1301	0,500001	Ok

Tabel 7. Rasio distribusi gaya lateral breis *frame* AS A dan AS D

Lantai	Breis RBKK <i>Frame</i> AS A					Breis RBKK <i>Frame</i> AS D				
	Ex		θ (deg)	Rasio	Ket	Ex		θ (deg)	Rasio	Ket
	T (ton)	C (ton)				T (ton)	C (ton)			
6	27,7433	27,666	53,1301	0,500698	Ok	26,8954	26,9999	53,1301	0,499031	Ok
5	54,0101	53,9607	53,1301	0,500229	Ok	52,6257	52,6988	53,1301	0,499653	Ok
4	75,1621	75,1117	53,1301	0,500168	Ok	73,2206	73,2969	53,1301	0,49974	Ok
3	88,78	88,7427	53,1301	0,500105	Ok	86,473	86,5283	53,1301	0,49984	Ok
2	100,1781	100,1739	53,1301	0,50001	Ok	97,5943	97,6078	53,1301	0,499965	Ok
1	94,3768	94,3754	53,1301	0,500004	Ok	91,8276	91,8297	53,1301	0,499994	Ok

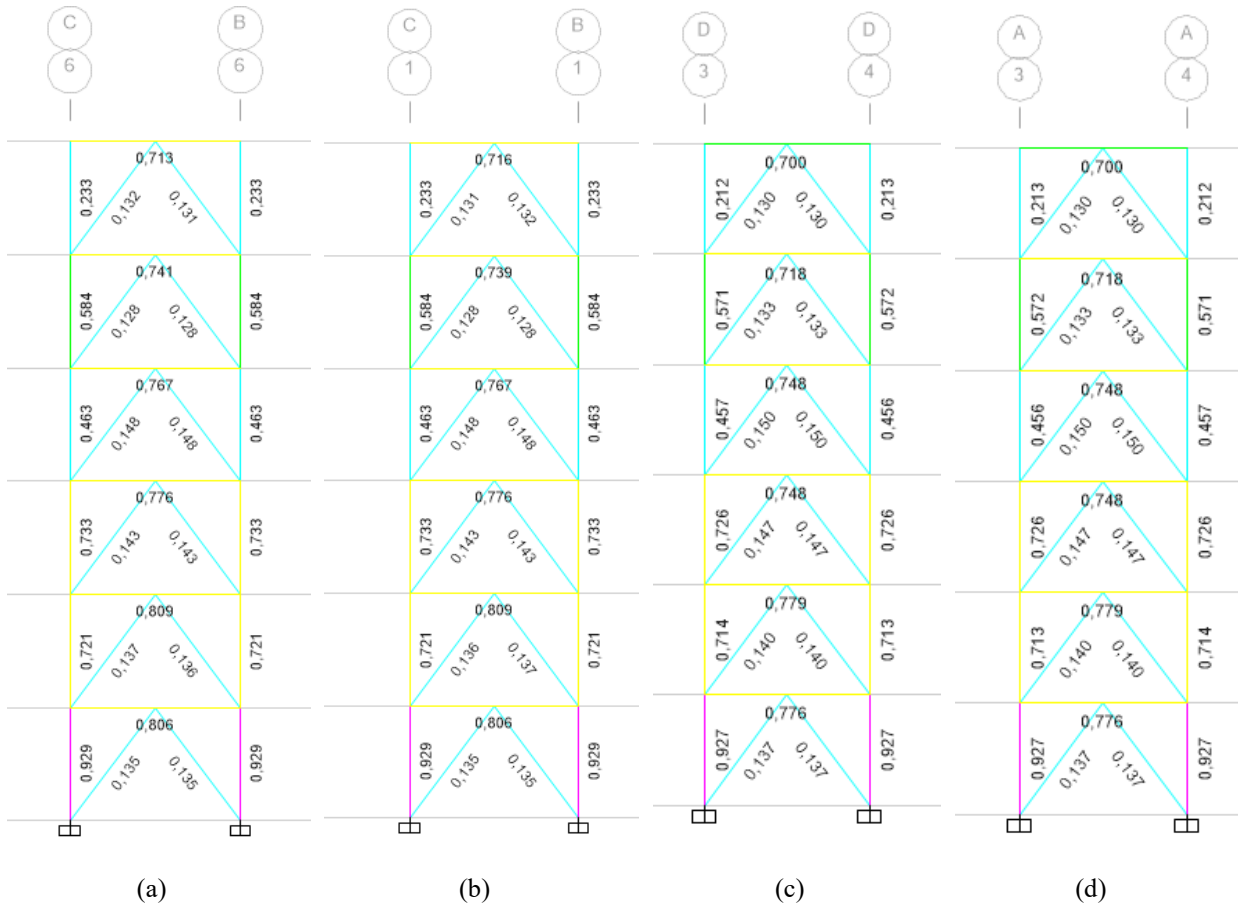


Gambar 7. Gaya lateral breis *frame* AS 6 (a), 1 (b), A (c), dan D (d)

Gambar 7 menunjukkan distribusi gaya aksial pada breis ketika dikenakan beban gempa, breis sebelah kiri mengalami tarik (kuning) sedangkan breis sebelah kanan mengalami tekan (merah) dengan besaran gaya yang terlihat seperti di Tabel 6 dan 7. Perhitungan tersebut menunjukkan distribusi gaya lateral pada breis adalah kurang lebih sekitar 49% - 50%, sehingga breis sudah memenuhi persyaratan.

Pemeriksaan desain kapasitas

Hasil pemeriksaan desain kapasitas balok dan kolom dapat dilihat dari Gambar 8. Hasil D/C balok dan kolom bisa terlihat masih < 1 dengan demikian balok dan kolom sudah memenuhi persyaratan desain kapasitas.



Gambar 8. D/C kolom dan balok AS 6 (a), AS 1 (b), AS D (c), dan AS A (d)

Pemeriksaan komponen struktur

Menurut AISC 341 (2022) kolom, balok, dan breis harus memenuhi syarat komponen daktilitas tinggi. Pemeriksaan daktilitas komponen struktur dapat dilihat dari Tabel 8-10.

Tabel 8. Pemeriksaan daktilitas breis

Komponen	Profil	b (mm)	h (mm)	t (mm)	b/t	λ_{hd}	Cek	r (mm)	Lc (mm)	Lc / r	Cek
Breis	HSS 210x210x16x16	210	210	16	11,125	14,41	Daktilitas Tinggi	79,5	5000	62,893	OK
	HSS 200x200x16x16	200	200	16	10,5	14,41	Daktilitas Tinggi	75,4	5000	66,313	OK
	HSS 180x180x12x12	180	180	12	13	14,41	Daktilitas Tinggi	68,8	5000	72,674	OK

Pemeriksaan p-delta

Pemeriksaan P-delta sesuai dengan SNI 1726:2019 dengan hasil pada Tabel 11-12. Hasil pemeriksaan P-delta menunjukkan struktur sudah stabil dengan tidak adanya pengaruh P-delta.

Tabel 9. Pemeriksaan daktilitas balok

Komponen	Profil	b (mm)	h (mm)	t _f (mm)	t _w (mm)	b/t _f	h/t _w	C _a	λ_{hd} <i>unstiffened</i> <i>elements</i>	λ_{hd} <i>stiffened</i> <i>elements</i>	Cek
Balok	WF 800x300x16x24	150	752	24	16	6,25	47,00	0,019	6,65	53,26	Daktilitas Tinggi
	WF 800x300x18x36	150	728	36	18	4,1667	40,44	0,031	6,65	52,57	Daktilitas Tinggi

Tabel 10. Pemeriksaan daktilitas kolom

Komponen	Profil	b (mm)	h (mm)	t _f (mm)	t _w (mm)	b/t _f	h/t _w	C _a	λ_{hd} <i>unstiffened</i> <i>elements</i>	λ_{hd} <i>stiffened</i> <i>elements</i>	Cek
Kolom	HB 250x250x14x24	125	202	24	14	5,2083	14,43	0,101	6,65	48,58	Daktilitas Tinggi
	HB 350x350x18x36	175	278	36	18	4,86	15,44	0,198	6,65	46,32	Daktilitas Tinggi
	HB 400x400x22x44	200	312	44	22	4,55	14,18	0,287	6,65	44,63	Daktilitas Tinggi

Tabel 11. Pemeriksaan p-delta arah x

Story	Elevasi	Diaph	Hi	Mi	Cum. Gravity (Mass Source) Load	Drift x	Storry Shear V _x	Stability Ratio	θ min	θ max	Status
			(m)	(kN)	(kN)	(m)	(kN)	θ			
Atap	24	D1	4	269,26	269,26	0,008	48,86	0,011	0,1	0,1	No P Delta
Lt.6	20	D1	4	377,73	646,99	0,009	98,62	0,015	0,1	0,1	No P Delta
Lt.5	16	D1	4	381,87	1028,86	0,008	134,09	0,016	0,1	0,1	No P Delta
Lt.4	12	D1	4	384,69	1413,55	0,008	160,30	0,017	0,1	0,1	No P Delta
Lt.3	8	D1	4	386,55	1800,10	0,006	178,34	0,016	0,1	0,1	No P Delta
Lt.2	4	D1	4	388,14	2188,24	0,004	187,31	0,012	0,1	0,1	No P Delta

Tabel 12. Pemeriksaan p-delta arah y

Story	Elevasi	Diaph	Hi	Mi	Cum. Gravity (Mass Source) Load	Drift y	Storry Shear V _y	Stability Ratio	θ min	θ max	Status
			(m)	(kN)	(kN)	(m)	(kN)	θ			
Atap	24	D1	4	269,26	269,26	0,008	48,76	0,011	0,1	0,1	No P Delta
Lt.6	20	D1	4	377,73	646,99	0,010	98,65	0,016	0,1	0,1	No P Delta
Lt.5	16	D1	4	381,87	1028,86	0,009	134,21	0,017	0,1	0,1	No P Delta
Lt.4	12	D1	4	384,69	1413,55	0,008	160,50	0,018	0,1	0,1	No P Delta
Lt.3	8	D1	4	386,55	1800,10	0,007	178,62	0,017	0,1	0,1	No P Delta
Lt.2	4	D1	4	388,14	2188,24	0,004	187,70	0,013	0,1	0,1	No P Delta

Pemeriksaan *interstory drift* dan ketidakberaturan

Pemeriksaan *interstory drift* sesuai dengan SNI 1726:2019 dengan hasil pada Tabel 13, dengan nilai *limit* diambil 0,02. Sedangkan hasil pemeriksaan ketidakberaturan adalah tidak ditemukan ketidakberaturan baik vertikal maupun horizontal pada struktur.

Performance point

Hasil *performance point* dapat dilihat pada Tabel 14 atau Gambar 9-10. Berdasarkan kurva tersebut terlihat bahwa baik pada model 1 maupun model 2 di masing-masing arah untuk kondisi elastis struktur tidak mengalami perbedaan ditandai dengan garis kurva yang berimpit Hasil perbandingan *performance point* model 1 dan model 2 yaitu perbedaan yang diperoleh sangat kecil sehingga variasi lokasi sendi plastis tidak berpengaruh pada *performance point*.

Tabel 13. *Interstory drift* arah x dan y

Story	Height (m)	Drift X	Drift Y	Drift Elastis		Limit	Cek	
				Drift X	Drift Y		Drift X	Drift Y
Atap	4	0,0020	0,0021	0,0100	0,0104	0,02	Ok	Ok
Lt.6	4	0,0023	0,0024	0,0115	0,0121	0,02	Ok	Ok
Lt.5	4	0,0021	0,0022	0,0105	0,0110	0,02	Ok	Ok
Lt.4	4	0,0019	0,0020	0,0096	0,0100	0,02	Ok	Ok
Lt.3	4	0,0016	0,0017	0,0080	0,0084	0,02	Ok	Ok
Lt.2	4	0,0010	0,0011	0,0051	0,0054	0,02	Ok	Ok

Tabel 14. *Performance point* pada level beban MCE dan DBE model 1 dan model 2

Arah Gempa	Level Gempa	Metode Analisis	Model 1			Model 2		
			V_p (kN)	δ_p (m)	Step	V_p (kN)	δ_p (m)	Step
X	MCE	CSM	8109,64	0,23	6	8109,64	0,23	6
		DCM	7221,4	0,24	7	7223,2	0,238	7
X	DBE	CSM	6744,4	0,186	5	6744,4	0,186	5
		DCM	7966,5	0,225	6	7966,5	0,225	6
Y	MCE	CSM	8267,9	0,235	4	8102,6	0,229	4
		DCM	8394	0,24	5	8297,5	0,24	5
Y	DBE	CSM	6822,1	0,187	4	6786,7	0,185	4
		DCM	7969,7	0,226	4	7998,5	0,226	4

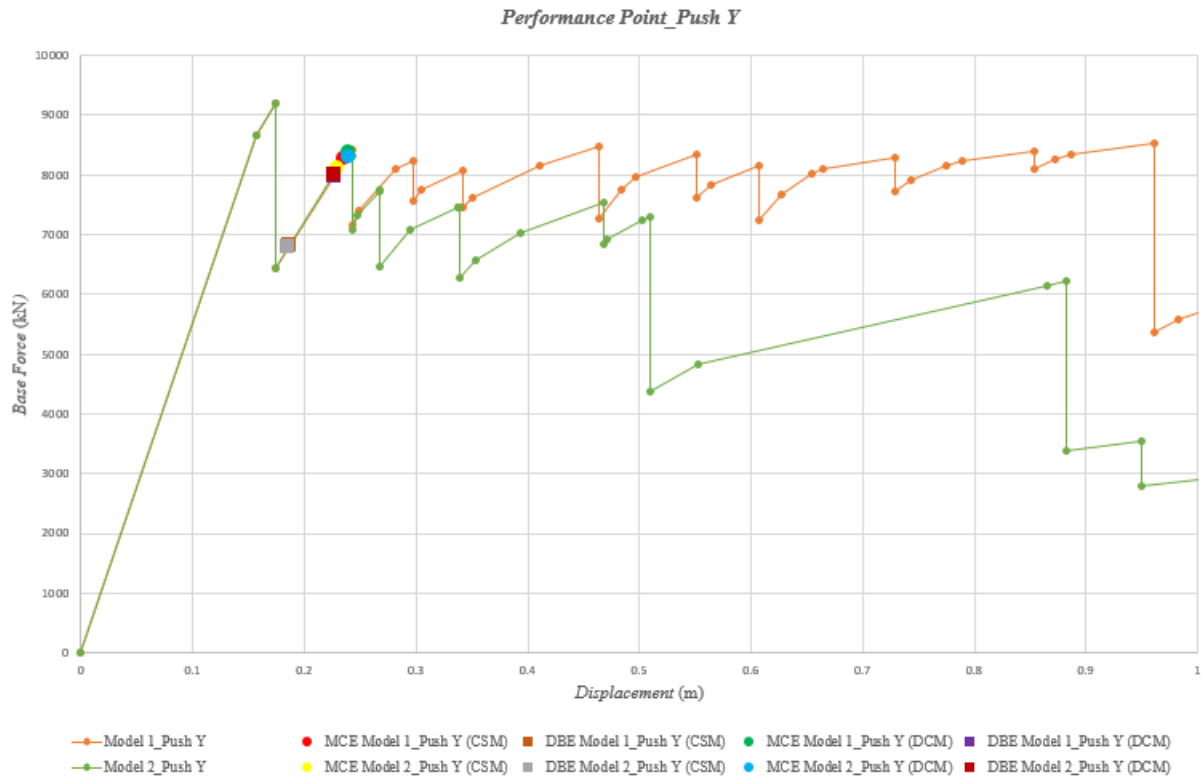


Gambar 9. *Performance point* model 1 dan model 2 arah x

Pemeriksaan kriteria penerimaan

- Struktur global
Hasil pemeriksaan gaya geser model 1 dan model 2 masing-masing dalam Tabel 15, menunjukkan bahwa gaya geser pada *performance point* sudah terpenuhi yaitu V_p harus $> 80\% V_y$ masing-masing pada level beban DBE maupun MCE (FEMA 356, 2000). Selain itu dalam pemeriksaan total *drift* seperti pada Tabel 16, level kinerja struktur kedua model adalah sama masuk ke level *Immediate Occupancy* (IO) baik pada level beban DBE

maupun MCE. Kriteria ini memenuhi target kinerja struktur yaitu untuk level beban DBE adalah LS sedangkan untuk level beban MCE adalah CP (ATC 40, 1996).



Gambar 10. Performance point model 1 dan model 2 arah y

Tabel 15. Pemeriksaan gaya geser pada performance point model 1 dan model 2

Arah Gempa	Level Gempa	Metode Analisis	Model 1				Model 2			
			V _p (kN)	V _y (kN)	80% V _y (kN)	Cek	V _p (kN)	V _y (kN)	80% V _y (kN)	Cek
X	MCE	DCM	7221,4	8543,9	6835,1	OK	7223,2	8542,5	6834	OK
	DBE	DCM	7966,5	7802,3	6241,8	OK	7966,5	7802,3	6241,8	OK
Y	MCE	DCM	8394	7148,4	5718,7	OK	8297,5	7271,3	5817	OK
	DBE	DCM	7969,7	7488,2	5991	OK	7998,5	7475,4	5980,3	OK

Tabel 16. Pemeriksaan total drift pada performance point model 1 dan model 2

Arah Gempa	Level Gempa	Metode Analisis	Model 1				Model 2			
			δ _p (m)	h bangunan (m)	rasio drift	Kinerja	δ _p (m)	h bangunan (m)	rasio drift	Kinerja
X	MCE	CSM	0,23	24	0,96%	IO	0,23	24	0,96%	IO
		DCM	0,24	24	1,00%	IO	0,238	24	0,99%	IO
X	DBE	CSM	0,186	24	0,78%	IO	0,186	24	0,78%	IO
		DCM	0,225	24	0,94%	IO	0,225	24	0,94%	IO
Y	MCE	CSM	0,235	24	0,98%	IO	0,229	24	0,95%	IO
		DCM	0,24	24	1,00%	IO	0,24	24	1,00%	IO
Y	DBE	CSM	0,187	24	0,78%	IO	0,185	24	0,77%	IO
		DCM	0,226	24	0,94%	IO	0,226	24	0,94%	IO

- Kolom
Tabel 17-18 menunjukkan hasil pemeriksaan sendi plastis pada kolom di model 1 dan model 2. Selain diperiksa akibat dari beban aksial (P) juga diperiksa akibat dari momen (M3) karena pada kolom lantai dasar, momen

yang diterima cukup besar. Hasilnya jika dilihat antara model 1 dan model 2 untuk gaya aksial rata-rata perbedaan antara keduanya adalah 0,98% sedangkan untuk momen adalah 1,64% sehingga variasi sendi plastis di kolom tidak berpengaruh besar terhadap gaya dalam kolom. Tetapi jika dibandingkan dengan level kinerja antara model 1 dan model 2 terdapat perbedaan, pada model 1 ada beberapa kolom yang telah mencapai level IO sedangkan di model 2 belum ada kolom yang mencapai level IO.

Tabel 17. Pemeriksaan sendi plastis *force controlled* kolom model 1 akibat aksial (P) dan momen (M3)

Lantai	Elemen Kolom	Arah Gempa	Level Gempa	Step	Gaya Aksial (kN)	Kapasitas Aksial (kN)	D/C	Tingkat Kinerja	Momen (kNm)	Kapasitas Momen (kNm)	D/C	Tingkat Kinerja
Lantai 1-2	HB. 400x400 x22x44	X	MCE	7	9977,7	17120	0,58	IO	1098,6	2264,7	0,49	<IO
			DBE	6	10105,2		0,59	IO	605,8		0,27	<IO
		Y	MCE	5	10169,3		0,59	IO	633,9		0,28	<IO
			DBE	4	10128,5		0,59	IO	621,9		0,27	<IO
Lantai 3-4	HB. 350x350 x18x36	X	MCE	7	5911	12293	0,48	<IO	389,7	1433,3	0,17	<IO
			DBE	6	6503		0,53	IO	390,2		0,17	<IO
		Y	MCE	5	6520		0,53	IO	413,1		0,18	<IO
			DBE	4	6494,2		0,53	IO	403,8		0,18	<IO
Lantai 5-6	HB. 250x250 x14x24	X	MCE	7	801,9	6035	0,13	<IO	28,3	499,1	0,01	<IO
			DBE	6	899,7		0,15	<IO	29,9		0,01	<IO
		Y	MCE	5	906,7		0,15	<IO	34		0,02	<IO
			DBE	4	904		0,15	<IO	33,1		0,01	<IO

Tabel 18. Pemeriksaan sendi plastis *deformation controlled* kolom model 2 akibat aksial (P) dan momen (M3)

Lantai	Elemen Kolom	Arah Gempa	Level Gempa	Step	Gaya Aksial (kN)	Kapasitas Aksial (kN)	D/C	Momen (kNm)	Kapasitas Momen (kNm)	D/C	Tingkat Kinerja (Bacaan <i>Deformation Controlled</i>)
Lantai 1-2	HB. 400x400 x22x44	X	MCE	7	9977,7	17120	0,58	1098,6	2264,7	0,49	<IO
			DBE	6	10105,2		0,59	605,8		0,27	<IO
		Y	MCE	5	10054,5		0,59	655,6		0,29	<IO
			DBE	4	9784,9		0,57	606,5		0,27	<IO
Lantai 3-4	HB. 350x350 x18x36	X	MCE	7	5911	12293	0,48	389,7	1433,3	0,17	<IO
			DBE	6	6503		0,53	390,2		0,17	<IO
		Y	MCE	5	6472,5		0,53	408,8		0,18	<IO
			DBE	4	6283,5		0,51	385,5		0,17	<IO
Lantai 5-6	HB. 250x250 x14x24	X	MCE	7	801,9	6035	0,13	28,3	499,1	0,01	<IO
			DBE	6	899,7		0,15	29,9		0,01	<IO
		Y	MCE	5	899,3		0,15	32,5		0,01	<IO
			DBE	4	882,1		0,15	31,9		0,01	<IO

- Balok
Tabel 19 menunjukkan hasil pemeriksaan sendi plastis pada balok di model 1 dan model 2. Hasilnya jika dilihat antara model 1 dan model 2 untuk rata-rata perbedaan gaya momen antara keduanya cukup tinggi yaitu 17,5% sehingga variasi sendi plastis cukup berpengaruh terhadap momen balok. Jika dibandingkan dengan level kinerja antara model 1 dan model 2 juga terdapat perbedaan yang cukup besar, pada model 1 balok di lantai 3 sudah ada yang mencapai level CP dan di lantai 4 mencapai level LS sedangkan pada model 2 semua balok belum mencapai level IO.
- Breis
Level kinerja pada breis dapat dilihat dari Tabel 20. Terlihat bahwa ada perbedaan level kinerja breis antara model 1 dan 2 pada lantai 1 – 4 di level beban DBE arah y. Breis model 1 telah mencapai level LS sedangkan pada model 2 masih di level IO. Meskipun demikian jika hasil grafik *output* ETABS diperhatikan level IO pada model 2 sudah sangat mendekati zona LS. Sehingga dapat disimpulkan variasi lokasi sendi plastis pada balok dan kolom tidak berpengaruh terhadap level kinerja breis.

Tabel 19. Pemeriksaan sendi plastis *force controlled* balok model 1 akibat momen (M3) dan sendi plastis *deformation controlled* balok model 2 akibat momen (M3)

Lantai	Elemen Balok	Arah Gempa	Level Gempa	Step	Model 1			Model 2			Tingkat Kinerja (Bacaan <i>Deformation Controlled</i>)
					Momen (kNm)	Kapasitas Momen (kNm)	D/C	Momen (kNm)	Kapasitas Momen (kNm)	D/C	
Lantai 2	WF. 800x300 x18x36	X	MCE	7	2659	4329	0,614	2659	4329	0,614	<IO
			DBE	6	231		0,053	231,5		0,053	<IO
		Y	MCE	5	229		0,053	292,6		0,068	<IO
			DBE	4	200		0,046	124,5		0,029	<IO
Lantai 3	WF. 800x300 x18x36	X	MCE	7	4322	4329	0,998	4314,2	4329	0,997	<IO
			DBE	6	4304		0,994	4305		0,994	<IO
		Y	MCE	5	4383,6		1,013	4378,2		1,011	<IO
			DBE	4	4375,8		1,011	4328,9		1,000	<IO
Lantai 4	WF. 800x300 x18x36	X	MCE	7	4128	4329	0,954	4128	4329	0,954	<IO
			DBE	6	4128,6		0,954	4128,6		0,954	<IO
		Y	MCE	5	4189,4		0,968	4310,6		0,996	<IO
			DBE	4	4181,3		0,966	4091,7		0,945	<IO
Lantai 5	WF. 800x300 x18x36	X	MCE	7	13,6	4329	0,002	13,6	4329	0,002	<IO
			DBE	6	15		0,002	15		0,002	<IO
		Y	MCE	5	16,7		0,003	36,4		0,006	<IO
			DBE	4	17,3		0,003	36,8		0,006	<IO
Lantai 6	WF. 800x300 x16x24	X	MCE	7	37,9	3195	0,012	37,9	3195	0,012	<IO
			DBE	6	38,5		0,012	38,5		0,012	<IO
		Y	MCE	5	43,2		0,014	26		0,008	<IO
			DBE	4	43		0,013	26		0,008	<IO
Lantai Atap	WF. 800x300 x16x24	X	MCE	7	8,3	3195	0,003	8,3	3195	0,003	<IO
			DBE	6	8,5		0,003	8,5		0,003	<IO
		Y	MCE	5	11,4		0,004	9,2		0,003	<IO
			DBE	4	11,4		0,004	9,3		0,003	<IO

Tabel 18. Perbandingan level kinerja breis model 1 dan model 2

Lantai	Elemen Breis	Arah Gempa	Level Gempa	Step	Level Kinerja	
					Model 1	Model 2
Lantai 1-2	HSS 210x210x16x16	X	MCE	7	IO	IO
			DBE	6	IO	IO
		Y	MCE	5	LS	LS
			DBE	4	LS	IO
Lantai 3-4	HSS 200x200x16x16	X	MCE	7	LS	LS
			DBE	6	LS	LS
		Y	MCE	5	LS	LS
			DBE	4	LS	IO
Lantai 5-6	HSS 180x180x12x12	X	MCE	7	<IO	<IO
			DBE	6	<IO	<IO
		Y	MCE	5	<IO	<IO
			DBE	4	<IO	<IO

Pemeriksaan tingkat kinerja

Target kinerja struktur ditentukan dari level kinerja komponen-komponennya Rangkuman target kinerja dapat dilihat pada Tabel 21. Model 1 sudah melewati batas target kinerja struktur pada arah y dengan level beban DBE karena sudah ada komponen yang masuk level CP. Sedangkan pada model 2 untuk masing-masing arah belum ada komponen yang melewati batas target kinerja struktur.

Tabel 21. Target kinerja struktur model 1 dan model 2

Arah Gempa	Level Gempa	Metode Analisis	Model 1				Model 2			
			V_p (kN)	δ_p (m)	Step	Tingkat Kinerja Struktur	V_p (kN)	δ_p (m)	Step	Tingkat Kinerja Struktur
X	MCE	CSM	8109,64	0,23	6	LS	8109,64	0,23	6	LS
		DCM	7221,4	0,24	7	LS	7223,2	0,238	7	LS
X	DBE	CSM	6744,4	0,186	5	IO	6744,4	0,186	5	IO
		DCM	7966,5	0,225	6	LS	7966,5	0,225	6	LS
Y	MCE	CSM	8267,9	0,235	4	CP	8102,6	0,229	4	IO
		DCM	8394	0,24	5	CP	8297,5	0,24	5	LS
Y	DBE	CSM	6822,1	0,187	4	CP	6786,7	0,185	4	IO
		DCM	7969,7	0,226	4	CP	7998,5	0,226	4	IO

Pembentukan sendi plastis

Mekanisme pembentukan sendi plastis dapat dilihat pada Tabel 22, menunjukkan bahwa sendi plastis terbentuk pertama kali dan pada step yang sama antara kedua model sedangkan level sendi plastis yang mencapai >CP pertama kali antara kedua model memberikan hasil yang berbeda. Model 1 balok pertama kali mencapai level >CP tetapi di model 2 yang mencapai level >CP pertama kali adalah breis dengan jumlah step yang juga lebih sedikit dibandingkan model 1.

Tabel 22. Mekanisme pembentukan sendi plastis

	Arah	Step	Komponen Struktur	Kriteria Penerimaan	Step	Komponen Struktur	Kriteria Penerimaan
Model 1	X	1	Breis	<IO	8	Balok	>CP
	Y	1	Breis	<IO	4	Balok	>CP
Model 2	X	1	Breis	<IO	9	Breis	>CP
	Y	1	Breis	<IO	8	Breis	>CP

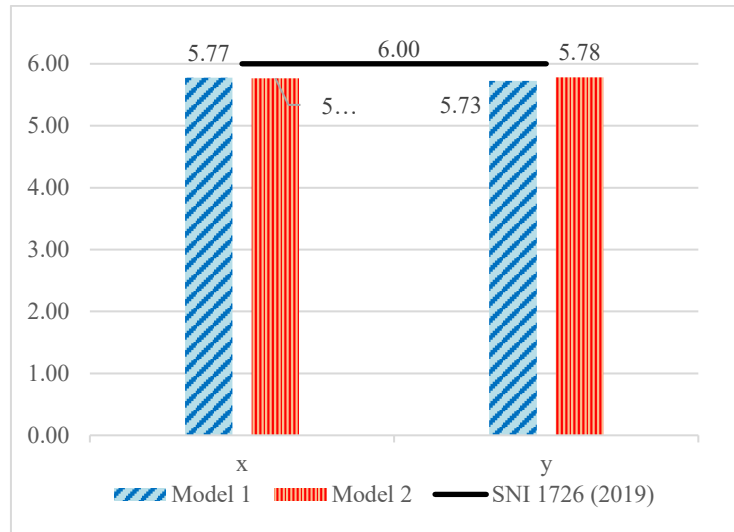
Pemeriksaan parameter daktilitas struktur

Parameter untuk menghitung nilai modifikasi respon (R), faktor kuat lebih (Ω_0) dan faktor pembesaran defleksi (C_d) dihitung langsung dari kurva *pushover* level gempa MCE dengan hasil seperti pada Gambar 11. Model 1 dan model 2, variasi lokasi sendi plastis tidak berpengaruh pada nilai R , Ω_0 , dan C_d ditandai dengan perbedaan yang sangat kecil diantara kedua model tersebut. Tetapi jika dibandingkan dengan SNI 1726 (2019) nilai R dan C_d sudah cukup mendekati nilai R dan C_d dari SNI tetapi nilai Ω_0 baik pada model 1 dan model 2 lebih besar dari nilai SNI. Hal ini menunjukkan bahwa kekuatan struktur menjadi terlalu besar atau terlalu konservatif.

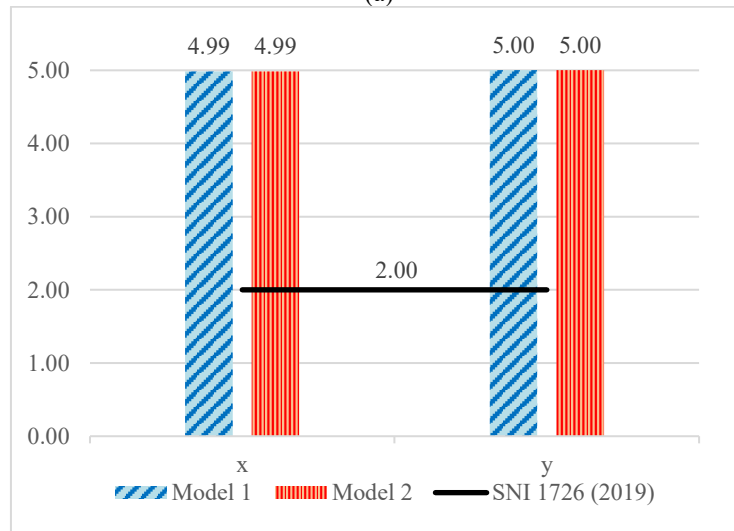
4. KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

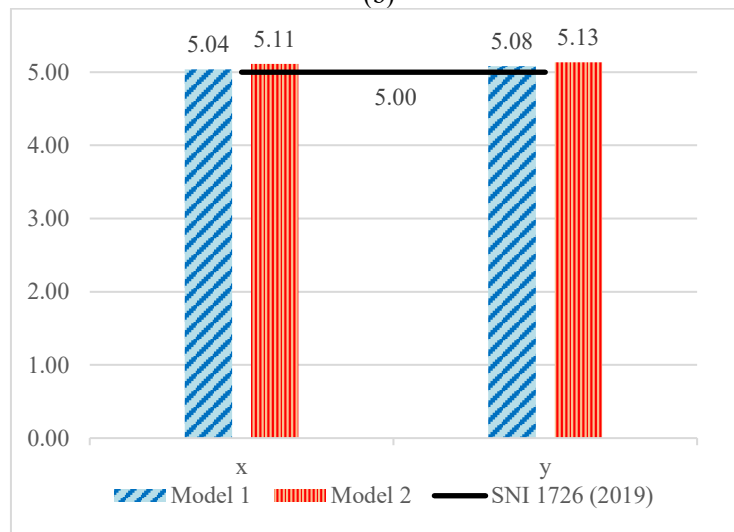
1. Variasi lokasi sendi plastis cukup berpengaruh terhadap target kinerja struktur. Kinerja struktur model 1 pada arah y dengan level gempa DBE sudah mencapai level CP, kinerja ini sudah melewati batas yang disyaratkan yaitu LS. Sedangkan pada model 2 untuk masing-masing arah belum ada komponen yang melewati batas target kinerja struktur.
2. Variasi lokasi sendi plastis memiliki pengaruh yang kecil terhadap *performance point*. Perbedaan gaya geser dan deformasi pada *performance point* di model 1 dan model 2 sangat kecil yaitu rata-rata perbedaan gaya geser adalah 0,51%, dan rata-rata perbedaan deformasi adalah 0,56%.
3. Variasi lokasi sendi plastis tidak berpengaruh terhadap nilai-nilai parameter daktilitas struktur. Perbedaan nilai parameter daktilitas struktur antara model 1 dan model 2 berturut-turut untuk R , Ω_0 , dan C_d adalah 1%, 0%, dan 1,4% untuk arah x dan 1%, 0%, dan 1% untuk arah y.
4. Variasi lokasi sendi plastis berpengaruh terhadap mekanisme sendi plastis ketika mencapai level >CP. Kegagalan struktur pada model 1 diawali dengan komponen balok sedangkan pada model 2 kegagalan struktur diawali dengan komponen breis.
5. Model 1 adalah model dengan variasi lokasi sendi plastis yang memberikan kinerja terburuk.



(a)



(b)



(c)

Gambar 11. Modifikasi respon, R (a), faktor kuat lebih, Ω_0 (b), dan faktor pembesaran defleksi, C_d (c)

Ucapan terima kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT Wijaya Kusuma Contractors atas bantuan dalam penggunaan program ETABS untuk penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, S. Y., Salih, O. A., & Najeebabba, O. (2022). Effect of plastic hinge properties in pushover analysis of reinforced concrete plane frames. *International Research Journal of Innovations in Engineering and Technology (IRJIET)*, 6(9), 42-48. doi:10.47001/IRJIET/2022.609006
- Alhussein, M. A., Nugroho, G., Wahiddin, & Nursetiawan. (2024). Concentric bracing frame in earthquake-resistant high-rise buildings. *Semesta Teknika*, 27(1), 81-97. doi:10.18196/st.v27i1.21864
- American Institute of Steel Construction. (2022). *Seismic provisions for structural steel buildings* (AISC 341-22). <https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/standards/a341-22w.pdf>
- American Institute of Steel Construction. (2022). *Specification for structural steel buildings* (AISC 360-22). <https://www.aisc.org/globalassets/product-files-not-searched/publications/standards/a360-22w.pdf>
- American Society of Civil Engineers. (2013). *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings* (ASCE 41-13). <https://ascelibrary.org/topic/ascbookseries/standards>
- American Society of Civil Engineers. (2017). *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings* (ASCE 41-17). <https://ascelibrary.org/topic/ascbookseries/standards>
- American Society of Civil Engineers. (2022). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures* (ASCE 7-22). <https://ascelibrary.org/topic/ascbookseries/standards>
- Applied Technology Council. (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings volume 1* (ATC-40). <https://www.atcouncil.org/pdfs/atc40toc.pdf>
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk bangunan gedung dan nongedung* (SNI 1726:2019). <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain* (SNI 1727:2020). <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>
- Benita, D. R., Desmaliana, E., & Pribadi, A. (2019). Analisis perbandingan kinerja struktur baja SRBKK tipe inverted-V pada gedung bertingkat 12, 16, dan 20 lantai. *Reka Racana: Jurnal Teknik Sipil*, 5(4), 65-74. doi:10.26760/rekaracana.v5i4.65
- Boenyamin, M. S., Prabowo, A., & Wijaya, H. (2025). Kinerja nonlinier rangka baja ter-breis konsentrik khusus pada rentang ketinggian 48-80 meter. *Jurnal Teknik Sipil Cendekia (JTSC)*, 6(2), 273-289.
- Federal Emergency Management Agency. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings* (FEMA 356). <https://nehrpsearch.nist.gov/static/files/FEMA/PB2009105376.pdf>
- Federal Emergency Management Agency. (2005). *Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures* (FEMA 440). <https://nehrpsearch.nist.gov/static/files/FEMA/PB2008108249.pdf>
- Hilma, F. T., & Anzhari, G. (2021). *Evaluasi kinerja bangunan menara universitas semarang menggunakan analisa pushover* [Tesis, Universitas Islam Sultan Agung]. <https://repository.unissula.ac.id/25599/>
- Ilham. (2020). Analisis kinerja bangunan rangka baja dengan bresing tahan tekuk terhadap beban gempa. *Reka Racana Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 6(2), 98-110. doi:10.26760/rekaracana.v6i2.98
- 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 Institut Teknologi Bandung*, 32(2), 199-208. doi:10.5614/jts.2025.32.2.8
- Saloma, Idris, Y., Hanafiah, & Octavianus, N. (2017). Structural behaviour of steel building with diagonal and chevron braced CBF (centrically braced frames) by pushover analysis. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, 7(2), 716-722. doi:10.18517/ijaseit.7.2.2341
- Sungkana, K. E., Prabowo, A., & Christianto, D. (2025). Evaluasi kinerja struktur bangunan gedung perkantoran 7 lantai dengan analisis pushover. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 8(2), 587-600.