

Analisis *seismic resilient* pada struktur portal baja *bracing* eksentris akibat modifikasi *replaceable long link* dengan metode numerik

Wahyu Nur Rohman¹, Muhammad Irfan Marasabessy^{2,*}, Muhammad Zakki Rizal Hidayat¹,
Nufriзал Faried Hanafi¹

¹PT. Pola Data Consultant, Sleman, Indonesia

²Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Sleman, Indonesia

Article Info

Available online

Keywords:

Seismic resilient steel
Replaceable link
Behavior of steel structures

Corresponding Author:

M Irfan Marasabessy
irfanmarssy@uii.ac.id

Abstract

Steel seismic force-resisting systems commonly employed in buildings include moment-resisting frames, eccentric bracing, and concentric bracing systems. During major earthquakes, beam elements may suffer severe damage and require replacement, which is often difficult to implement; therefore, alternative systems are needed. One proposed solution is the replaceable link (RL) system, although its effectiveness is strongly influenced by the link dimensions. This study investigates a modified replaceable long link configuration using four analytical models: Model A (conventional system), Model B (RL-WF 250), Model C (RL-WF 300), and Model D (RL-WF 300 with modified cross-section). The analysis was performed using three-dimensional Component-Based Finite Element Method (CBFEM) on a two-story frame structure subjected to combined gravity and seismic loads. A distributed load of 15 kN/m was applied to each beam, while lateral loads were determined using the equivalent static method according to SNI 9273:2025. The results show that Model D satisfied both resilience and collapse prevention (CP) drift criteria, making it a promising alternative for replaceable long link structural systems during strong seismic events.

Copyright © 2026 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Latar belakang

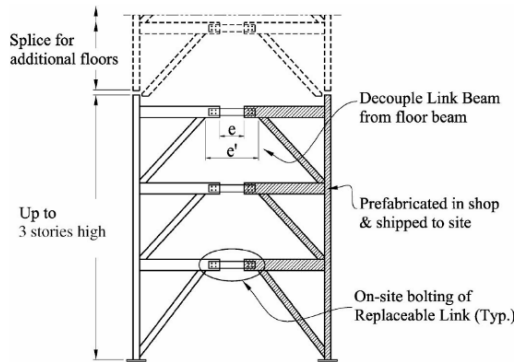
Struktur baja telah lama dikenal sebagai sistem penahan gempa yang sangat baik (Fang dkk., 2022) dikarenakan materialnya yang ringan, tetapi kekuatan serta daktilitasnya yang tinggi. Penggunaan baja dapat ditemukan pada berbagai macam tipe struktur, baik sederhana maupun kompleks seperti pada atap gudang, *facade*, dan rangka gedung (Boss, 2014).

Sistem struktur penahan gaya gempa pada baja yang sering digunakan adalah rangka penahan momen, rangka bracing eksentris dan kosentris. Selain itu, pada wilayah dengan tingkat kegempaan tinggi, sistem struktur baja

dapat dibuat khusus (BSN 1726, 2019) yang mana elemen-elemen tertentu dibiarkan terjadi kerusakan agar tidak meluas ke bagian lainnya, salah satunya adalah elemen balok. Ketika terjadi gempa besar maka elemen balok dapat terjadi kerusakan yang cukup parah yang mana untuk perbaikannya membutuhkan biaya dan waktu yang tidak sedikit. Maka, dari itu guna tercapainya sistem struktur baja yang tangguh (*seismic resilient steel structures*) diperlukan alternatif desain elemen/komponen struktur yang mudah diganti.

Salah satu alternatif adalah *replaceable link (RL)*. Pada sistem penahan gempa bracing eksentris. *Link* didefinisikan sebagai jarak yang dibuat di antara ke dua tumpuan ujung

bracing, *bracing* ke kolom atau *bracing* ke balok (Pangestuti & Suswanto, 2021). Konsep dari struktur dengan *replaceable link* ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Konsep portal dengan *replaceable link* (Mansour dkk., 2012)

Konsep di atas menjelaskan bahwa elemen *link* tidak menjadi satu kesatuan dengan balok utama tetapi dihubungkan dengan sambungan baut. Ketika *link* tersebut rusak maka dapat dilakukan pergantian tanpa mengganti seluruh balok dan membutuhkan waktu yang lebih cepat.

Permasalahan dari sistem ini adalah dimensi dari *link* tersebut. Apabila dimensi dari *link* adalah sama dengan dimensi dari profil utama maka besar kemungkinan terjadi pelelehan tidak di elemen *replaceable link* saja. Sementara itu, jika dimensi *link* lebih kecil maka terjadi penurunan kekakuan yang cukup besar yang menyebabkan simpangan tidak terpenuhi. Oleh karena itu, modifikasi pada elemen *replaceable link* tersebut diperlukan agar tercapai sistem struktur yang handal dan optimal.

Penelitian ini membahas tentang modifikasi *replaceable link* tersebut. Beban lateral adalah beban titik *pushover*. Penjabaran model uji sebagai berikut:

1. Model uji A = Model *bracing* eksentris konvensional (tanpa *replaceable link*)
2. Model uji B = Model *bracing* eksentris dengan ukuran *replaceable link* yang lebih kecil dari balok utama.
3. Model uji C = Model *bracing* eksentris dengan ukuran *replaceable link* yang sama dengan balok utama.

4. Model uji D = Model *bracing* eksentris dengan ukuran *replaceable link* yang sama dengan balok utama tetapi terdapat modifikasi penampang *link* tersebut.

Perilaku yang ditinjau adalah *displacement*, tegangan, tingkat kinerja struktur portal, pola tekuk dan syarat *resilient*.

Batasan penelitian

Batasan penelitian ini sebagai berikut :

1. Metode analisis menggunakan *Materially Non Linear Analysis (MNA)* dengan *Component Based Finite Element Method (CBFEM)* pada *software* Ideastatica.
2. Baut menggunakan mutu ISO 8.8 sedangkan baja menggunakan mutu S235 sesuai standar EN 1993 – 1 -1.
3. Struktur portal menggunakan 2 kolom portal 2 tingkat dengan nilai beban garis pada balok sebesar 15 kN/m.
4. Jenis portal eksentris bentuk K yang digunakan adalah *link* panjang.
5. Nilai gaya lateral menggunakan lateral statik ekuivalen level BSE-2N.
6. Terdapat kolom penahan gempa dan gravitasi.
7. Klasifikasi situs diasumsikan sedang dengan kategori risiko adalah II.
8. Asumsi material berpotensi besar runtuh terjadi ketika tercapainya tegangan ultimit.
9. Asumsi kerusakan parah adalah pada zona konsentrasi regangan plastis tertinggi.
10. Batasan regangan plastik tidak dibatasi 5%.

Landasan teori

Seismic resilient steel structures

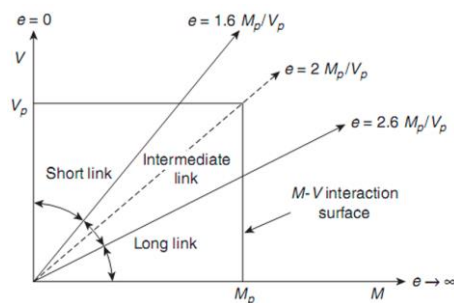
Seismic resilient steel structures adalah struktur baja yang dapat cepat dipulihkan kembali setelah guncangan gempa bumi yang kuat (Fang dkk., 2022). Contoh struktur ini adalah penggunaan sistem khusus yang mudah diganti dan dapat menghindari kerusakan pada struktur utama (Fang dkk., 2022). Ciri-ciri dari struktur *resilient* sebagai berikut (Moestopo, 2025):

1. Tidak ada kerusakan
Struktur ini dirancang dengan sistem khusus yang kaku dan kuat.
2. Kerusakan sangat minimal
Struktur ini dirancang dengan adanya kerusakan yang minor dan dapat berfungsi kembali setelah dilakukan perbaikan minor.
3. Kerusakan parah
Struktur ini dirancang agar terjadi kerusakan parah pada elemen yang mudah diganti.

Solusi lain dari *seismic resilient steel structures* adalah penggunaan elemen yang mudah diganti, *self centering structure*, *rocking structure* dan *smart materials* (Moestopo, 2025).

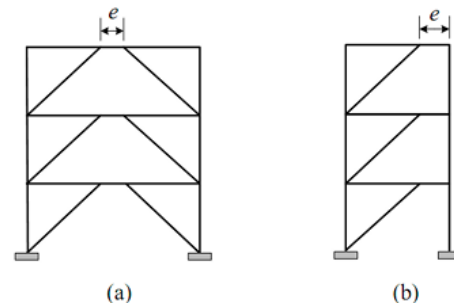
Portal baja bracing eksentris (EBF)

Portal baja bresing eksentris adalah salah satu sistem penahan gempa yang membatasi perilaku inelastis hanya terjadi pada balok *link* (Pangestuti & Suswanto, 2021). *Link* tersebut diartikan adalah jarak antara 2 tumpuan bracing atau bracing ke kolom. Bracing eksentris terdiri dari 3 jenis yaitu *link* pendek, menengah dan panjang (Suswanto dkk., 2017). Klasifikasi *link* ditunjukkan pada Gambar 2.



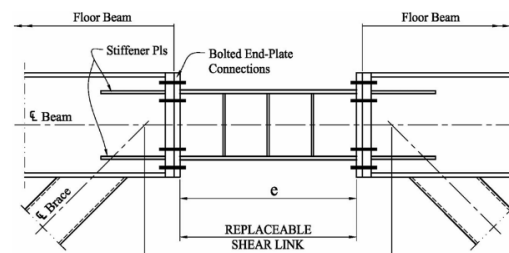
Gambar 2. Klasifikasi *link* (Suswanto dkk., 2017)

EBF memiliki kelebihan yaitu mempunyai *link* sebagai elemen leleh. Contoh konfigurasi pada Gambar 3.



Gambar 3. Contoh konfigurasi (a) Model K dan (b) Model D (Suswanto dkk., 2017)

Inovasi EBF terbaru adalah berupa *link* yang dapat diganti (*replaceable link*). Konsep yang dapat diganti ini memiliki fleksibilitas yang lebih besar untuk memilih penampang (Mansour dkk., 2012). Contoh *replaceable link* dengan sambungan *end plate* ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Sambungan baut *end plate* pada *replaceable link* (Mansour dkk., 2012)

Berdasarkan Gambar di atas diketahui jika elemen *link* rusak maka pergantian lebih mudah karena menggunakan sambungan baut.

Component based finite element method (CBFEM)

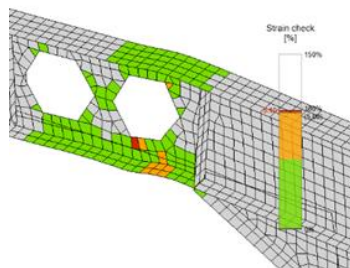
CBFEM adalah suatu perpaduan pendekatan standar dan FEM untuk mendesain sambungan baja (Ideastatica, 2026; Rohman dkk., 2026; Wald dkk., 2020). Analisis distribusi tegangan pada CBFEM dihitung menggunakan FEM sehingga lebih tepat. Oleh karena itu, metode ini memberikan informasi yang jelas tentang perilaku elemen struktur dengan cepat, efisien dan sesuai dengan standar.

Model material baja pada CBFEM menggunakan model diagram material yang dijabarkan dari model plastis ideal, elastis dengan pengerasan regangan, dan diagram

tegangan-regangan nyata (Wald dkk., 2020). Asumsi model material (Rohman dkk., 2026; Wald dkk., 2020):

1. Material elastoplastis dengan adanya perkuatan regangan sesuai EN 1993-1-5:2006.
2. Perilaku material berdasarkan kriteria luluh *von mises*. Material diasumsikan bersifat elastis ketika tegangan aktual belum mencapai batas leleh.

Metode CBFEM juga dapat diaplikasikan dalam desain model struktur (Rohman dkk., 2026). Hal ini merupakan solusi dari kekurangan *software* analisa struktur lain yang hanya menampilkan gaya terjadi tetapi perhitungan sambungan dihitung terpisah. Model struktur CBFEM dapat dimodelkan secara 3D sehingga dapat mengetahui perilaku setiap elemen secara aktual. Contoh model ditunjukkan Gambar 5.



Gambar 5. Contoh analisa 3D struktur baja kastela (Rohman dkk., 2026)

Terdapat 3 metode analisis alternatif melalui CBFEM (Rohman dkk., 2026):

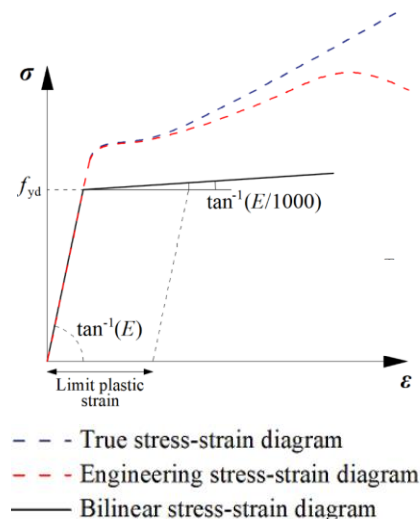
1. Metode MNA (*Materially Non-Linear Analysis*).
2. LBA - *Linear Buckling Analysis (stability)*.
3. GMNIA - *Geometrically and Materially Non-linear Analysis with Imperfections*.

Alternatif yang dipilih adalah metode MNA karena merepresentasi kondisi *non linear*.

Pemodelan struktur dengan CBFEM Ideastatica

Kriteria umum yang digunakan dalam analisa CBFEM pada suatu model struktur adalah sebagai berikut:

1. Material
Material baja menggunakan proyeksi grafik ideal plastis, linear dengan perkuatan regangan dan hubungan tegangan-regangan yang nyata (Ideastatica, 2026; Wald dkk., 2020). Diagram material ditunjukkan Gambar 6.



Gambar 6. Diagram model numerik material baja (Ideastatica, 2026).

Program Ideastatica memakai diagram material elastis-plastis kemiringan leleh sebesar $\tan^{-1}(E/1000)$. Kriteria kelelahan *von mises* menjadi dasar dalam analisa perilaku material. Asumsi analisis adalah material berperilaku elastis jika nilai tegangan kurang dari tegangan leleh desain (Ideastatica, 2026). Jika tegangan aktual lebih besar maka material tersebut masuk kondisi plastis.

2. Analogi model pelat
Program Ideastatica memakai analogi model elemen cangkang dan deformasi pada elemen dibagi menjadi komponen membran dan lentur (Ideastatica, 2026; Wald dkk., 2020). Perilaku plastis aktual juga dianalisa pada setiap titik sedangkan tahap elastis-plastis nonlinear setiap lapisan didasari oleh regangan material tersebut (Ideastatica, 2026).
3. *Mesh*
Pembuatan *mesh* di program itu otomatis dilakukan berdasarkan pengaturan

ukuran. Ukuran dari *mesh* secara *default* adalah 10 sampai 50 mm.

Gaya gempa statik ekivalen elastis

Analisa gaya gempa linear terbagi menjadi 3 yaitu lateral ekivalen, spektrum respon ragam dan respon riwayat waktu linear (BSN 1726, 2019). Syarat dari penggunaan statik ekivalen dijabarkan pada tabel 16 SNI 1726 2019 yang mana salah satu poinnya adalah struktur dengan kategori resiko II yang tidak melebihi 2 tingkat diatas dasar (BSN 1726, 2019). Standar dalam perhitungan ini dapat menggunakan SNI 1726 2019 atau SNI 9273 2025. Tetapi karena nilai R akibat perubahan dari *link* statis menjadi *replaceable link* maka lebih baik menggunakan analisa SNI 9273 2025. Perbedaan analisa terletak dari nilai R yang mana SNI 9273:2025 tidak menggunakan nilai R sebagai perhitungan gaya gempa (FEMA P-2006, 2018). Berikut rumus gaya gempa statik ekivalen SNI 9273 2025 pada persamaan 1.

$$V = C_1 * C_2 * C_m * S_a * W \quad (1)$$

Keterangan :

$C_1 C_2$ = Faktor modifikasi

C_m = Faktor massa efektif

W = Berat efektif struktur

V = Gaya gempa dasar elastis

S_a = Spectral *acceleration*.

Nilai dari C_m untuk struktur baja terbreis eksentris adalah 1 pada jumlah tingkat maksimal sebesar 2 (BSN 9273, 2025). Nilai S_a diperoleh dari S_{xs}/T . Tetapi nilai S_a tidak boleh melebihi S_{xs} . Nilai S_{xs} gedung 2 tingkat pada level gempa BSE-2N sama dengan $S_s * F_a$. F_a adalah koefisien situs periode pendek (BSN 1726, 2019).

Tingkat kinerja struktur bangunan kategori resiko II

Target kinerja sebuah struktur ditentukan oleh level bahaya gempa dan kategori resiko bangunan (ASCE 41, 2017; BSN 9273, 2025). Bangunan baru dengan kategori resiko II pada level bahaya gempa BSE-2N adalah *Collapse prevention*.

Collapse prevention (CP) didefinisikan sebagai kerusakan pasca gempa adalah struktur telah rusak tetapi masih sanggup menahan beban grafitasi (ASCE 41, 2017). Simpangan ijin maksimal untuk rangka momen struktur baja target kinerja CP sebesar $5 \% * H$ (FEMA 273, 1997; FEMA 356, 2000). Lalu, untuk struktur EBF memiliki simpangan ijin maksimum sebesar $4 \% * H$ (Kianmehr, 2021). Kerusakan pada kondisi CP bersifat permanen ditandai terjadi deformasi aktual sama dengan deformasi titik E. Titik E diasumsikan ketika material memiliki potensi besar runtuh.

Metodologi penelitian

Data material baja

Mutu material baja dipilih S235 karena agar sejalan dengan asumsi perilaku material yang berdasarkan standar Eurocode pada *software*. Properti material seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Properti baja mutu S235 (EN 1993-1-1, 2005)

Properti	Keterangan
Modulus elastis	210000 MPa
Tegangan leleh	235 MPa
Tegangan ultimit	360 MPa
Poison ratio	0.3

Kemudian, berat volume sebesar 7850 kg/m³ (PPPURG-87, 1987; Setiawan, 2008).

Data profil elemen baja

Spesifikasi profil baja yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi profil baja

Keterangan	Profil
Kolom <i>seismic</i>	WF 400x200
Kolom <i>non seismic</i>	WF 300x150
Balok	WF 300x150
Bracing	WF 250x125
RL – Model B	WF 250x125
RL – Model C	WF 300x150
RL – Model D	WF 300x150 + lubang diameter 100 mm
Lokasi lubang RL – Model D	150 mm dari sambungan baut

RL = *Replaceable Link*

Link yang digunakan adalah jenis *long link* sesuai batasan penelitian. Perhitungan panjang minimum kondisi *long link* pada rumus 2.

$$E_{pmin} = \frac{F_y * Z_x * 2.6}{0.6 * F_y * A_w} \quad (2)$$

$$E_{pmin} = \frac{235 * 522076.5 * 2.6}{0.6 * 235 * 1950}$$

$$E_{pmin} = 1.16 \text{ m}$$

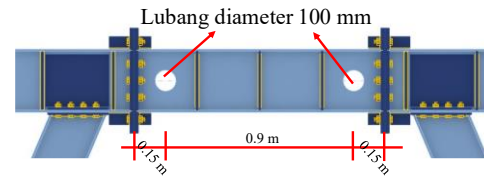
Keterangan :

E_{pmin} = Panjang *link* minimum kondisi *long link*.

Z_x = Modulus penampang plastis

A_w = Luas bidang badan

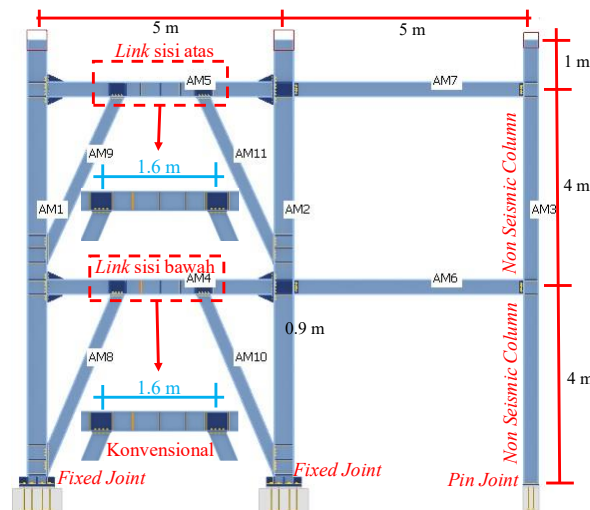
Panjang *link* yang digunakan adalah 1.6 m. Visualisasi dari lokasi lubang RL – model D ditunjukkan pada Gambar 7.



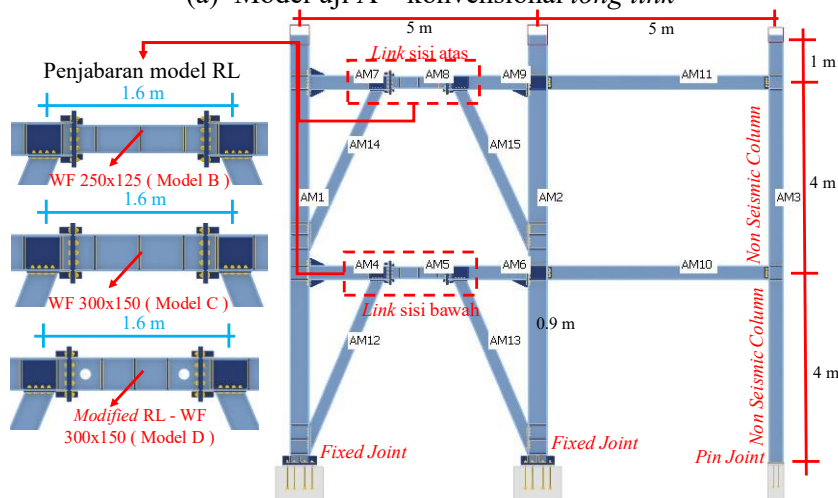
Gambar 7. Konsep modifikasi *replaceable link*

Data model struktur

Model struktur portal memiliki tingkat 1 dan tingkat 2. Jarak antar kolom adalah 5 m. Model portal struktur baja terlihat pada Gambar 8.



(a) Model uji A – konvensional *long link*



(b) Skema model uji *replaceable long link*

Gambar 8. Model uji struktur

Data sambungan *baseplate* ditunjukkan pada Tabel 3 sampai 4.

Tabel 3. Dimensi *fixed joint*

Keterangan	Nilai
Tebal <i>baseplate</i>	50 mm
Properti angkur	D 30 mm 8.8
Mutu <i>baseplate</i>	S 235
Tebal pelat rib	12 mm
Tebal grout	30 mm
f'c kolom pedestal	28 MPa

Tabel 4. Dimensi *pin joint baseplate*

Keterangan	Nilai
Tebal <i>baseplate</i>	16 mm
Properti angkur	D 16 mm 8.8
Mutu beton	28 MPa

Data sambungan momen dan geser antara kolom balok dilihat pada Tabel 5 dan 6.

Tabel 5. Dimensi sambungan momen

Keterangan	Nilai
Tebal pelat tumpu	20 mm
Diamater baut	20 mm
Mutu pelat	S235

Tabel 6. Dimensi sambungan geser

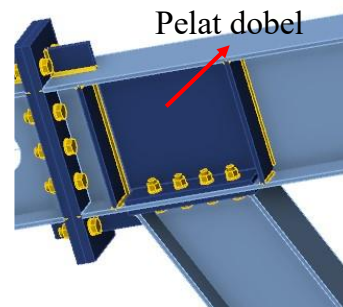
Keterangan	Nilai
Tebal pelat tumpu	12 mm
Diamater baut	16 mm
Mutu pelat	S235

Data sambungan *bracing* ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Dimensi sambungan *bracing*

Keterangan	Nilai
Tebal pelat tumpu	12 mm
Diamater baut	16 mm
Tebal <i>double plate</i>	10 mm
Mutu pelat	S235

Visualisasi dari sambungan *bracing* dengan pelat dobel pada Gambar 9.

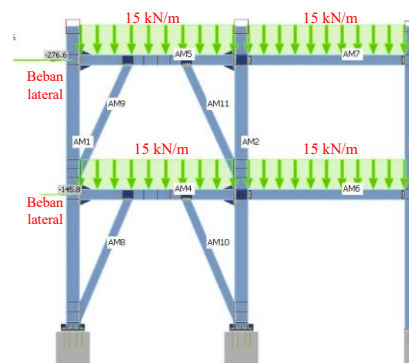


Gambar 9. Sambungan *bracing* ke balok utama dengan pelat dobel

Kemudian setiap pengaku memiliki tebal sebesar 10 mm.

Data pembebanan struktur

Beban garis yang berada diatas balok sebesar 15 kN/m pada masing-masing tingkat. Beban lateral yang diberikan pada *joint* balok kolom setiap tingkat. Besaran beban lateral mengikuti beban gempa statik ekuivalen elastis. Berikut penempatan beban ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Penempatan pembebanan model

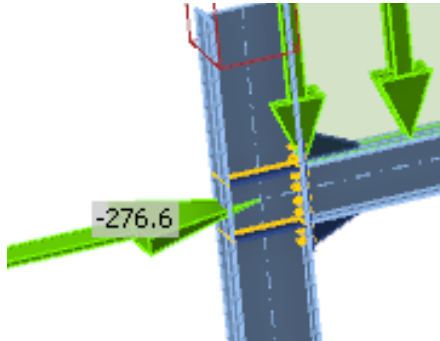
Beban garis memproyeksikan beban tambahan yang ditopang oleh portal. Parameter beban gempa diambil pada daerah Yogyakarta yang mana S_s sebesar 1.28 g. Maka perhitungan gaya *base shear* elastis sebagai berikut :

$$V = 1.1 * 1 * 1.28 * 1 * 300$$

$$V = 422.4 \text{ kN}$$

Nilai $W = 300 \text{ kN}$. Kemudian, dengan menggunakan perhitungan pembagian beban maka didapatkan beban lateral elv 4 m sebesar 145.8 kN dan elv 8 m sebesar 276.6 kN. Nilai ini yang nantinya akan di-input ke dalam

struktur. Input beban ke struktur ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Contoh input beban lateral (input beban pada elv 8 m)

Hasil dan pembahasan

Hasil pemodelan

Hasil dari pemodelan berupa gaya lateral, lendutan lateral yang terjadi pada setiap pemodelan. Nilai deformasi diambil pada titik ujung atas yaitu elv 9 m. Hasil pemodelan model uji A ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 8. Hasil model uji A

Gaya Base Shear (kN)	Displ. Lateral Ujung (mm)
0	0
42.24	5
84.48	9.9
126.72	14.7
168.96	19.6
211.2	24.6
253.44	29.7
295.68	35.5
337.92	48.3
380.16	87.2
422.4	349

Hasil model uji B ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 9. Hasil model uji B

Gaya Base Shear (kN)	Displ. Lateral Ujung (mm)
0	0
42.24	5.6
84.48	11.1
126.72	16.6
168.96	22.2
211.2	27.8
253.44	34.2

Lanjutan Tabel 10. Hasil model uji B

Gaya Base Shear (kN)	Displ. Lateral Ujung (mm)
295.68	44.6
337.92	83.8
380.16	260.9
422.4	825.4

Hasil model uji C ditunjukkan pada Tabel 11.

Tabel 11. Hasil model uji C

Gaya Base Shear (kN)	Displ. Lateral Ujung (mm)
0	0
42.24	5.2
84.48	10.3
126.72	15.4
168.96	20.5
211.2	25.7
253.44	31.1
295.68	37.7
337.92	51
380.16	82.2
422.4	224.6

Hasil model uji D ditunjukkan pada Tabel 12.

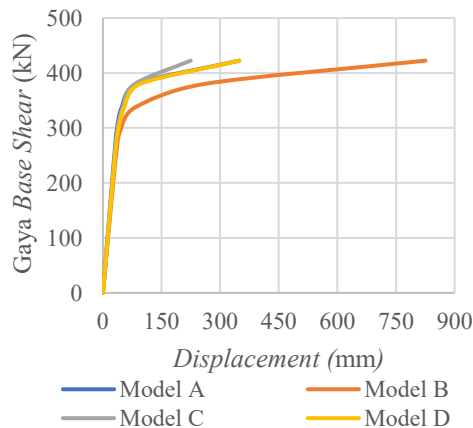
Tabel 12. Hasil model uji D

Gaya Base Shear (kN)	Displ. Lateral Ujung (mm)
0	0
42.24	5.3
84.48	10.4
126.72	15.5
168.96	20.7
211.2	25.9
253.44	31.5
295.68	38.7
337.92	54.7
380.16	95.3
422.4	349.5

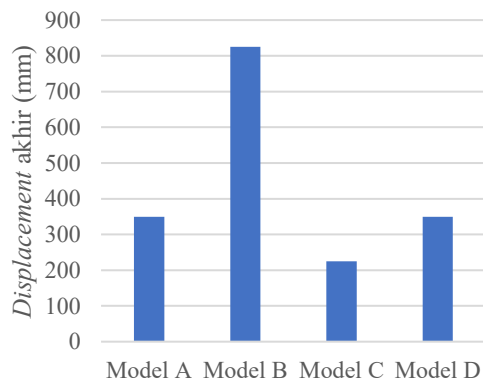
Perbandingan semua model secara grafik ditunjukkan pada Gambar 12.

Gambar 13 menunjukkan adanya transisi dari yang sebelumnya *linear* menjadi *non linear*. Hal ini menunjukkan bahwa metode MNA CBFEM mampu merepresentasikan perilaku *non linear* struktur.

Diketahui bahwa model A memiliki *displacement* sebesar 349 mm; model B 825.4 mm; model C 224.6 mm dan model D sebesar 349.5 mm. Oleh karena itu, model yang memiliki *displacement* terbesar adalah model B dan yang terkecil adalah model C. Maka perbandingan *displacement* ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 12. Hubungan gaya lateral dan *displacement*

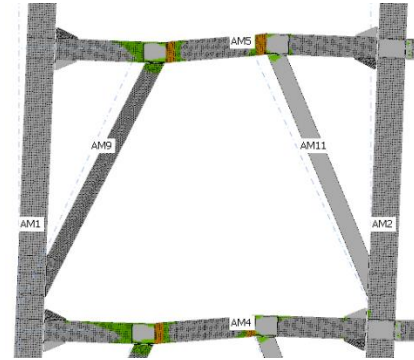


Gambar 13. Perbandingan displacement

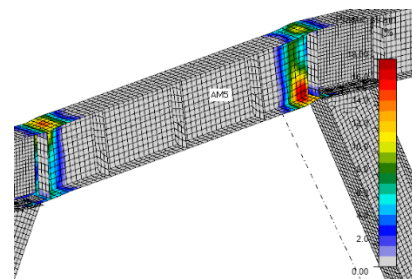
Berdasarkan Gambar 14 diketahui bahwa hanya model A, C dan D memenuhi syarat simpangan target kinerja CP ($0.04 * 9000 = 360 \text{ mm}$).

Pola tekuk baja profil

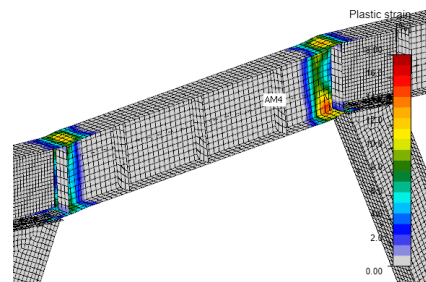
Pola tekuk hanya ditinjau pada kondisi beban maksimum dan pada sekitar *link*. Berikut kondisi *link* dari model uji A pada Gambar 14 sampai 16.



Gambar 14. Deformasi pada *link* model uji A

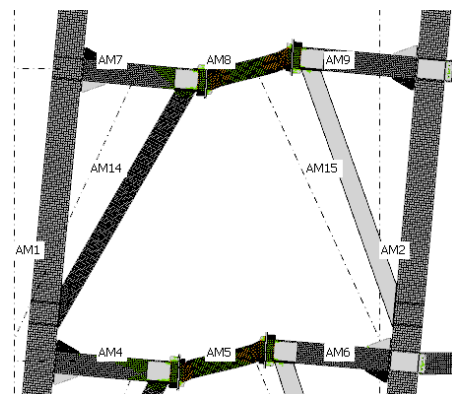


Gambar 15. Tekuk *link* sisi atas model uji A

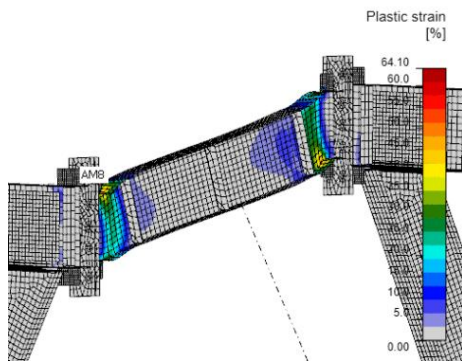


Gambar 16. Tekuk *link* sisi bawah model uji A

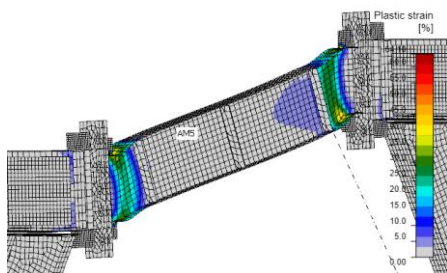
Regangan plastis terbesar model A terletak pada daerah dekat tumpuan bracing dan berada pada bidang *link*. Model B ditunjukkan pada Gambar 17 sampai 19.



Gambar 17. Deformasi pada *link* model uji B

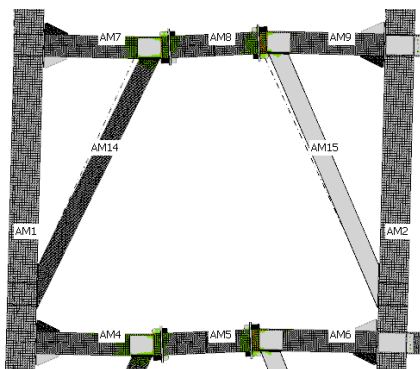


Gambar 18. Tekuk pada *link* sisi atas model uji B

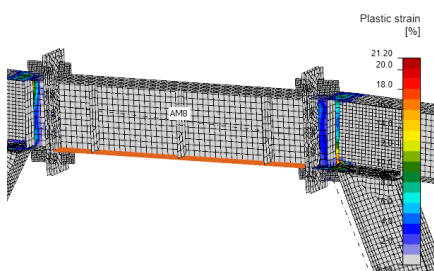


Gambar 19. Tekuk *link* sisi bawah model uji B

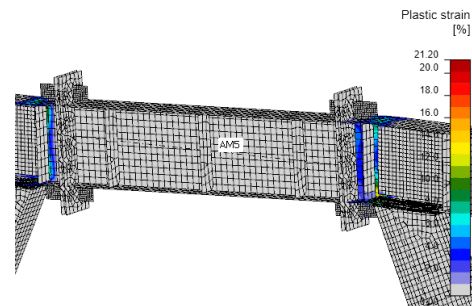
Regangan plastis terbesar model B terletak pada daerah *replaceable link* dekat dengan sambungan baut. Model C ditunjukkan pada Gambar 20 sampai 22.



Gambar 20. Deformasi pada *link* model uji C



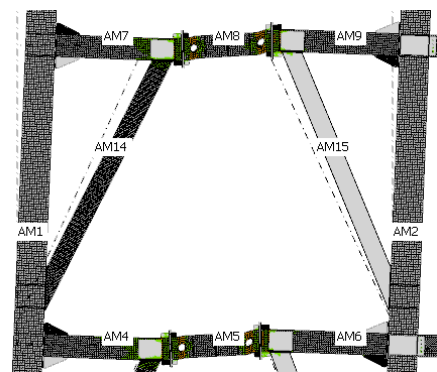
Gambar 21. Tekuk pada *link* sisi atas model uji C



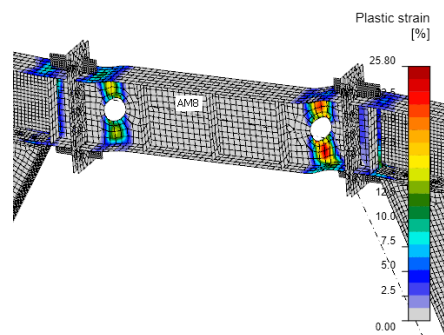
Gambar 22. Tekuk *link* sisi bawah model uji C

Regangan plastis terbesar model C terletak pada daerah struktur utama (luar *replaceable link*). Spesifiknya dekat dengan sambungan baut. Model D ditunjukkan pada Gambar 23 sampai 25.

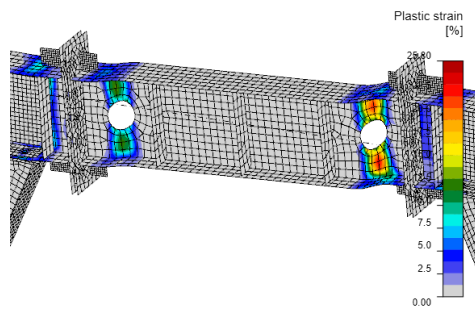
Regangan plastis terbesar model D terletak pada daerah *replaceable link*. Spesifiknya dekat dengan lubang web. Berdasarkan tegangan yang terjadi semua model uji memenuhi kriteria CP karena tegangan maksimal aktual kurang dari 360 MPa.



Gambar 23. Deformasi pada *link* model uji D



Gambar 24. Tekuk pada *link* sisi atas model uji D



Gambar 25. Tekuk *link* sisi bawah model uji C

Pengecekan syarat *resilient structure*

Syarat yang dijadikan acuan di sini adalah kemudahan dalam mengganti elemen yang rusak sehingga kerusakan terparah didesain terjadi pada elemen yang mudah diganti. Acuan kerusakan pada model numerik adalah nilai regangan plastis. Semakin tinggi konsentrasi regangan plastis maka titik tersebut adalah kerusakan terparah.

Berdasarkan regangan plastis terbesar maka jelas sekali model A dan C tidak termasuk. Hal ini karena elemen utama terjadi memiliki konsentrasi regangan plastis terbesar.

Model yang memenuhi kriteria *resilient* adalah model B dan D. Hal ini karena konsentrasi regangan plastis terbesar terjadi pada *replaceable link*. Namun, sebagai catatan bahwa struktur utama model D juga mengalami regangan plastis yang besar tetapi sebesar elemen *replaceable link*. Oleh karena itu, model terbaik secara kaidah *resilient* adalah B.

Justifikasi pemilihan model struktur

Pemilihan model harus mempunyai dasar teknis yang jelas. Berdasarkan data di atas diketahui model B bersifat sangat *resilient* tetapi gagal dalam memenuhi kriteria simpangan kinerja CP. Sebaliknya dengan model A dan C, model ini memenuhi kriteria simpangan tetapi gagal dalam kriteria *resilient* karena struktur utama ikut rusak parah.

Berdasarkan pertimbangan di atas maka model yang mencakup semua syarat adalah model uji D. Hal ini karena model ini lulus

kriteria simpangan, *resilient* dan target kinerja.

Kesimpulan

Kesimpulan dari analisa di atas sebagai berikut :

1. Terdapat 4 model uji mulai dari A (konvensional), B (*replaceable link* – WF 250), C (*replaceable link* – WF 300) dan D (*replaceable link* WF 300 dengan modifikasi penampang).
2. Model B bersifat sangat *resilient* tetapi tidak memenuhi kriteria simpangan kinerja CP.
3. Model A dan C memenuhi kriteria simpangan tetapi tidak memenuhi kriteria *resilient* karena struktur utama ikut rusak parah.
4. Model yang mencakup semua syarat adalah model uji D.

Daftar pustaka

- ASCE 41. (2017). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. In *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. American Society of Civil Engineers.
- Bossa, M. R. V. (2014). *Perencanaan Struktur Atap Gable Frame Dengan Menggunakan Profil Baja WF Dengan Metode LRFD Pada Proyek Balroom Ijen Padjadjaran Suits Resort and Convention Hall Malang*. Institut Teknologi Nasional Malang.
- BSN 1726. (2019). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Jakarta :Badan Standarisasi Nasional.
- BSN 9273. (2025). *Evaluasi dan Rehabilitasi Seismik untuk Bangunan Gedung Eksisting*. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- EN 1993-1-1. (2005). *Eurocode 3 : Design Steel Structures - Part 1-1 : General Rules and Rules For Building*. European Committee For Standardization.
- Fang, C., Wang, W., Qiu, C., Hu, S., Macrae, G. A., & Eatherton, M. R. (2022). Seismic resilient steel structures: A review of research, practice, challenges and opportunities. *Journal of Construction Steel Research*, 191.
- FEMA 273. (1997). *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Federal Emergency Management Agency.
- FEMA 356. (2000). *Pre Standard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building*. Washington

- DC : Federal Menergency Management Agency.
- FEMA P-2006. (2018). *Example Aplication Guide fpr ASCE/SEI 41-13 Seismic Evaluation and Retrofit of Exixting Buildings*. Washington D.C : Federal Emergency Management Agency.
- Ideastatica. (2026). *What is the CBFEM? What is the CBFEM?* <https://www.ideastatica.com/support-center/what-is-the-cbfem?>
- Kianmehr, A. (2021). *Effect of the Bracing System on the Probability of Collapse of Steel*. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/2323758>
- Mansour, N., Christopoulos, C., Asce, M., & Tremblay, R. (2012). Experimental Validation of Replaceable Shear Links for Eccentrically Braced Steel Frames. *Journal of Structural Engineering*, 137(10), 1141–1152. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000350](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000350)
- Moestopo, M. (2025). Toward Seismically Resilient Steel Structures. *Seminar & Short Course - HAKI Komda DI Yogyakarta*.
- Pangestuti, P. A., & Suswanto, B. (2021). Analisis Performa Eccentrically Braced Frames (EBF) Vertikal Link Menggunakan Wide Flange (WF) Link. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 19, 247–256.
- PPPURG-87. (1987). *Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung*. Jakarta : Departemen Pekerjaan Umum.
- Rohman, W. N., Marasabessy, M. I., Hidayat, M. Z. R., & Hanafi, N. F. (2026). Perilaku Struktur Gable dengan Rafter Profil Kastela Akibat Variasi Posisi Lubang Terhadap Tumpuan. *Cereform 10 Universitas Islam Indonesia*, 5(2), 23–34.
- Setiawan, A. (2008). *Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD*. Erlangga.
- Suswanto, B., Rizki, A., Wahyuni, E., & Wilson, J. (2017). *Numerical Behavior Study of Short Link , Intermediate Link and Long Link in Eccentrically Braced Frame Steel Structure*. 12(21), 11460–11471.
- Wald, F., Sabatka, L., Bajer, M., Jehlicka, P., Kabelac, J., Kozich, M., Kurikova, M., & Vild, M. (2020). *Component-Based Finite Element Design of Steel Connections*. Czech Technical University.