

Kajian Numerik dan Eksperimental pada Struktur Core Rangka Baja dengan Balok Perangkai dan Link yang Dapat Diganti

Muslinang Moestopo^(*)

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Pusat Rekayasa Industri – Institut Teknologi Bandung,
Jalan. Ganesha No. 10 Bandung, Email: moestopo@si.itb.ac.id

Indi Rama

Balai Prasarana Permukiman Wilayah Sumatera Barat - Kementerian PUPR
Jalan Batang Arau No. 86 Berok Nipah, Padang Barat, Padang, Email: indi.rama@pu.go.id

Intan Nuriskha Rachma

Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan – Institut Teknologi Bandung,
Jalan Ganesha No 10, Email: nuriskharachmaintan@gmail.com

Abstrak

Kinerja link pada struktur core rangka baja dengan balok perangkai dan link pada bangunan bertingkat 10 dibahas melalui kajian numerik dan eksperimental. Kajian numerik dilakukan dengan analisis non-linier statik dan dinamik terhadap sejumlah link dengan variasi panjang, tebal pelat sayap, dan tebal pelat badan; dengan mempertahankan elemen struktur core frame lainnya tetap elastik. Hasil kajian terhadap kekakuan, kekuatan, daktilitas, disipasi energi, dan mekanisme kelelahan struktur core menunjukkan penggunaan link geser pada struktur core dengan penebalan web memberikan kelebihan dibandingkan dengan penggunaan link lentur, dan menunjukkan kemampuan memikul gaya geser gempa yang tidak banyak berkurang dibandingkan struktur core tanpa link. Kajian eksperimental berupa pembebanan siklik terhadap sistem core rangka baja dengan balok perangkai dan link geser yang dapat diganti, menunjukkan link geser dengan penebalan pelat badan memberikan kinerja seismik yang lebih baik.

Kata Kunci : Link yang dapat diganti, link geser, balok perangkai, struktur core rangka baja, kinerja seismik

Abstract

Numerical and experimental work are conducted to study the performance of steel core frame with coupling beam and link of a 10th story building. Non-linear static and dynamic analyses are carried out to a number of core frames with links of various length, flange thickness, and web thickness, while maintaining the other elements remain elastic. The analysis of stiffness, strength, ductility, energy dissipation, and yielding mechanism of core structure shows the advantage of shear link with increasing web thickness compared to flexural link, and shows slightly less base shear compared to core frame without link. Experimental work with cyclic loading to a half-scaled core frame with coupling beam and replaceable link shows a better seismic performance of a shear link with increasing web thickness.

Keywords: Replaceable link, shear link, coupling beam, core frames, seismic performance.

1. Pendahuluan

Struktur rangka baja dengan pengaku eksentrik (*Eccentrically Braced Frames*) telah dikenal sebagai struktur baja pemikul beban gempa yang berkinerja baik, dalam hal kekakuan, kuat lebih, daktilitas, dan disipasi energi (Kasai dan Popov, 1986). Elemen link yang direncanakan leleh dan mendisipasi energi akibat beban gempa, selanjutnya digunakan dalam struktur core rangka baja pada bangunan tinggi (Moestopo, et al, 2018), yaitu dengan menempatkan elemen link di tengah bentang balok perangkai struktur core rangka baja yang diperkaku dengan bresing. Pada struktur ini, kerusakan akibat gempa akan dipusatkan pada link

yang leleh dan mendisipasi energi akibat beban gempa, yang dihubungkan dengan sambungan baut ke balok perangkai pada kedua ujungnya. Sementara itu, balok perangkai dan kolom pada struktur core diharapkan tetap elastik akibat beban gempa, sehingga link yang telah rusak dapat diganti dengan mudah dan dengan demikian akan dapat meningkatkan nilai ekonomis bangunan di daerah yang sering mengalami gempa.

Untuk memperoleh struktur core dengan kinerja yang diharapkan tersebut, diperlukan dimensi link (ukuran panjang maupun tebal pelat penampang link) yang mampu secara optimal mengakomodasi

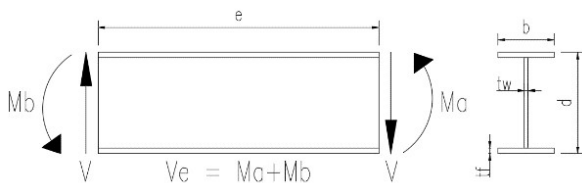
^{*} Penulis Korespondensi

kelelahan link tanpa menyebabkan kelelahan pada balok perangkai. Makalah ini berisi hasil kajian numerik dan eksperimental terhadap kinerja struktur *core* dengan balok perangkai dan link, dengan mengamati pola kegagalan pada sejumlah struktur *core* dengan berbagai ukuran dimensi link.

2. Link Yang Dapat Diganti

Struktur *core* rangka baja dengan menambahkan link pada balok perangkai belum diatur dalam Standar perancangan struktur tahan gempa, dan dalam kajian ini dianggap berperilaku seperti struktur rangka baja berpengaku eksentrik yang kinerjanya sangat ditentukan oleh kinerja seismik dari elemen link.

Gambar 1 menunjukkan gaya-gaya yang diperhitungkan bekerja pada sebuah link WF sepanjang e , akibat pembebanan lateral pada struktur bangunan; yaitu momen lentur di ujung link, M dan gaya geser sepanjang link, V .



Note : d : tinggi penampang
 b : lebar penampang
 t_w : tebal *web*
 t_f : tebal *flange*

Gambar 1. Diagram *free-body* link

Hubungan gaya dan panjang link, e dapat diformulasikan sebagai berikut

$$V = \frac{Ma + Mb}{e} = \frac{2Mp}{e}$$

$$e = \frac{2Mp}{V}$$

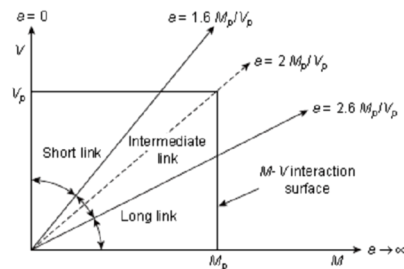
Apabila momen ujung, M_a dan M_b mencapai kapasitas lentur plastis link (M_p) maka akan terbentuk sendi plastis lentur pada link, sementara itu sendi plastis geser akan terbentuk jika gaya V mencapai kapasitas geser plastis link (V_p).

$$M_p = Z \cdot F_y$$

$$V_p = 0,6 \cdot F_y \cdot A_w$$

Z = Modulus Plastis penampang (mm^3)
 A_w = Luas penampang web (mm^2)
 F_y = Tegangan leleh (MPa)

Berbagai pengujian dilakukan untuk mengetahui panjang link sesuai dengan mekanisme kelelahan yang terjadi. Berdasarkan hasil penelitian Kasai dan Popov (1986), saat ini telah diadopsi ketentuan mengenai klasifikasi jenis dan panjang link yang menentukan jenis kelelehannya, seperti ditunjukkan dalam **Gambar 2**, sebagai berikut:



Gambar 2. Klasifikasi jenis link (Bruneau 2011)

1) Link Pendek / Link Geser

Kelelahan berupa tercapainya gaya geser V_p tanpa kelelahan akibat momen lentur yang belum mencapai M_p , dan ditandai dengan lelehnya web pada link.

2) Link Panjang / Link Lentur

Kelelahan berupa tercapainya momen lentur M_p sebelum gaya geser mencapai V_p , dan ditandai dengan lelehnya flange pada link.

3) Link Menengah

Kelelahan terjadi hampir bersamaan di web dan flange link

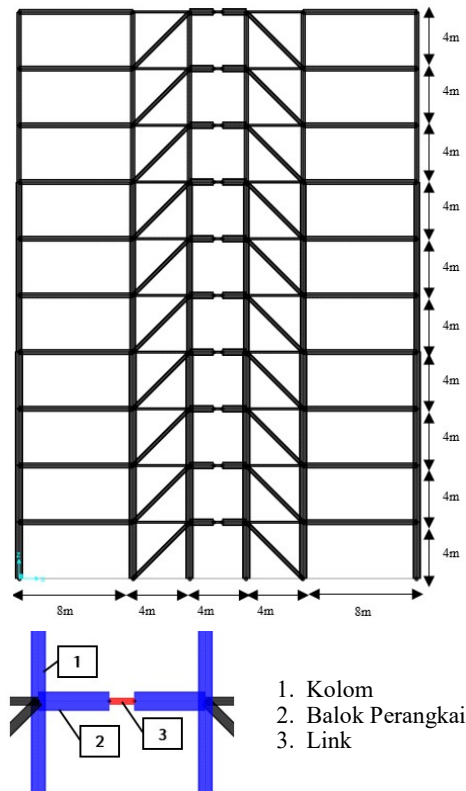
Hasil penelitian sebelumnya (Moestopo, et al, 2018 dan Kusumastuti, et al, 2018) menunjukkan potensi penggunaan link geser yang dapat diganti pada balok perangkai struktur *core* sebagai struktur pemikul beban gempa. Sambungan baut tipe friksi digunakan untuk menghubungkan link ke balok perangkai, yang selanjutnya akan memudahkan penggantian link yang rusak akibat gempa, tanpa terjadinya kelelahan pada balok perangkai maupun pelat penyambung.

3. Kajian Numerik

Sejumlah struktur *core* rangka baja dengan balok perangkai dan diperkaku oleh bresing (**Gambar 3**), dirancang untuk gedung perkantoran di atas tanah lunak di Jakarta sesuai ketentuan SNI 1726, 1729, 7860 dengan menggunakan penampang WF dengan mutu b41q A36. Sebuah struktur *bench-mark* (selanjutnya disebut struktur CB) dirancang tanpa menggunakan link, dan dengan dimensi penampang elemen-elemen ditunjukkan dalam **Tabel 1**.

Kajian numerik dilakukan dengan memvariasikan dimensi link (panjang, tinggi, lebar, tebal *web* dan tebal *flange*) seperti ditunjukkan dalam **Tabel 2**. Variasi panjang dan tebal *flange* dilakukan terhadap link lentur (struktur LL) sedangkan variasi tinggi, lebar, dan tebal *web* dilakukan terhadap link geser (struktur SH).

Analisis non-linier statik *push-over* dan analisis dinamik (riwayat waktu) dilakukan terhadap struktur menggunakan program PERFORM 3D dengan mendefinisikan perilaku non-linier elemen berupa kurva *back-bone* sesuai dengan FEMA 356, untuk mendapatkan kinerja struktur berupa kekakuan, kuat lebih, daktilitas, mekanisme kelelahan dan disipasi



Gambar 3. Geometri struktur

Tabel 1. Dimensi elemen komponen struktur

Elemen Komponen Struktur	Dimensi Elemen (mm)			
	Tinggi (d)	Lebar (b)	Tebal Web (tw)	Tebal Flange (tf)
Balok Perangkai	450	200	10	16
Balok L= 8 M*	400	200	10	19
Balok L= 4 M*	200	100	10	13
Kolom Lt. 8-10	350	350	18	34
Kolom Lt. 5-7	425	425	16	32
Kolom Lt. 2-4	500	500	19	38
Kolom Lt. 1	550	550	20	40
Bressing Lt. 6-10	200	200	10	16
Bressing Lt. 1-5	250	250	12	20

* Lantai 1 - 10

energi. **Gambar 4** dan **5** menunjukkan hubungan momen dan geser link terhadap rotasi link.

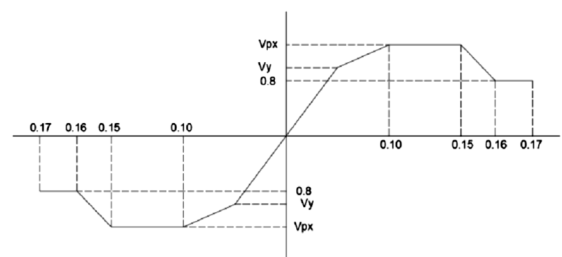
3.1 Kinerja struktur CB (*bench-mark*)

Analisis *push-over* dilakukan terhadap struktur *core* rangka baja dengan balok perangkai yang dirancang sesuai ketentuan SNI. Kinerja struktur yang ditunjukkan pada **Gambar 6** dan **7** selanjutnya dijadikan acuan (*bench-mark*) dalam menganalisis kinerja struktur dengan variasi dimensi link.

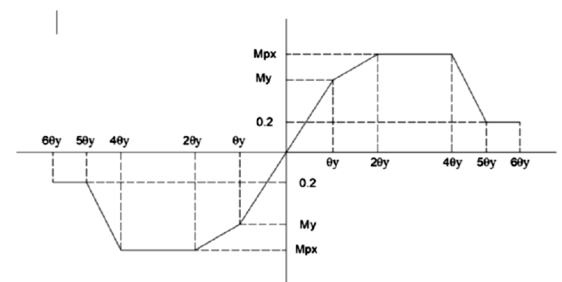
Kinerja struktur *bench-mark* dihasilkan oleh mekanisme pembentukan sendi plastis di ujung balok perangkai seperti terlihat pada **Gambar 7** sementara elemen *core*

Tabel 2. Dimensi elemen link

Model Struktur	Dimensi Link (mm)				Panjang Link (e) (mm)
	Tinggi (d)	Lebar (b)	Tebal Web (tw)	Tebal Flange (tf)	
CB	-	-	-	-	-
LL 1	150	75	5	7	900
LL 2	150	75	5	10	900
LL 3	150	75	5	10	1300
SH 1	150	75	5	7	300
SH 2	150	75	7	7	300
SH 3	150	75	10	7	300
SH 4	200	100	6	8	300
SH 5	200	100	8	8	300



Gambar 4. Kurva backbone geser-rotasi link



Gambar 5. Kurva backbone momen-rotasi link

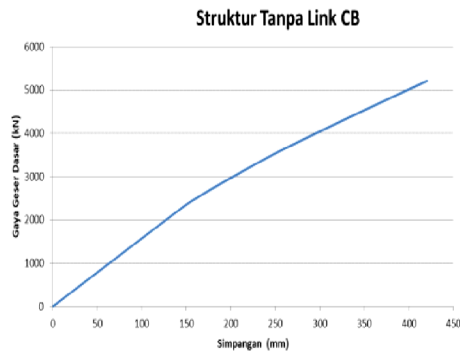
lainnya tetap dalam kondisi elastik tanpa mengalami leleh.

3.2 Kinerja struktur menggunakan link lentur

Kinerja struktur *core* dengan pemasangan link yang berbeda tebal *flange* (LL1 dan LL2) dan panjang link (LL3), diamati dan dibandingkan dengan kinerja struktur *bench-mark* dengan ukuran kolom, balok, dan bresing yang sama.

Gambar 8 menunjukkan perbandingan kurva *push-over* antara ketiga struktur (LL1, LL2, LL3) dengan struktur *bench-mark* (CB). Pemasangan link dengan dimensi yang lebih kecil dari dimensi balok perangkai, memberikan kekakuan dan kekuatan struktur *core* yang lebih rendah, dan juga kecenderungan struktur untuk gagal pada simpangan lateral yang masih relatif rendah.

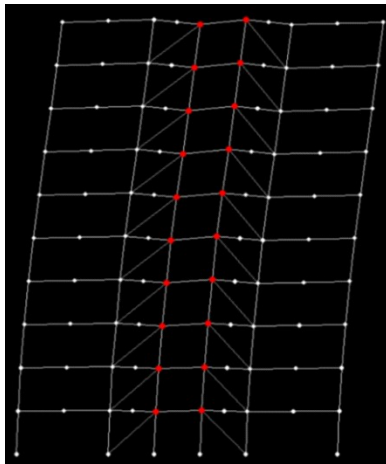
Tabel 4 menunjukkan beberapa indikasi berkurangnya kinerja struktur *core* dengan pemasangan link lentur,



Gambar 6. Kurva push-over struktur bench-mark - CB

Tabel 3. Kinerja struktur *bench-mark* - CB

Struktur CB		
Gaya Geser Dasar (kN)	V_y	2154
	V_{max}	5207
Simpangan (mm)	Δ_y	137
	Δ_{max}	420
Kinerja	μ	3.06
	Ω_0	2.42
	Energi Disipasi (kNm)	354

Gambar 7. Sendi plastis pada struktur *benchmark* - CB

termasuk berkurangnya kemampuan mendisipasi energi akibat kelelahan link lentur. Namun demikian, dapat diamati bahwa pada struktur LL2, penebalan *flange* pada link menjadi 10 mm (142%) meningkatkan kekakuan, kekuatan struktur, daktilitas tidak lebih dari 10% dibandingkan dengan struktur LL1 dengan tebal *flange* link 7 mm.

Pada struktur *core* dengan link lentur yang lebih panjang (LL3) menjadi 1300 mm (144%), diamati penurunan kekakuan dan gaya geser leleh V_y , namun disertai dengan peningkatan pada nilai kekuatan geser struktur *core* V_{max} (29%), daktilitas μ (63%), kuat lebih Ω_0 (59%), dan energi disipasi (100%).

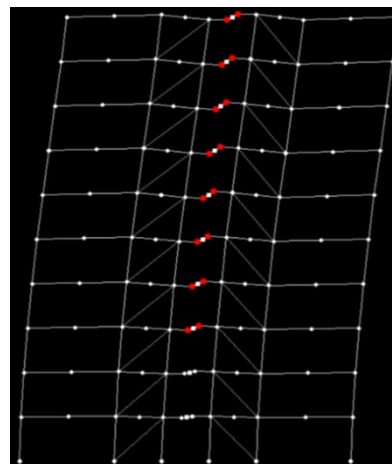
Gambar 9, 10, dan 11 menunjukkan pembentukan sendi plastis di ujung link pada akhir pembebanan



Gambar 8. Kurva push-over struktur dengan link lentur

Tabel 4. Kinerja struktur dengan link lentur

Struktur		CB	LL 1	LL 2	LL 3
Tebal <i>Flange</i> Link (mm)		-	7	10	10
Panjang Link (mm)		-	900	900	1300
Gaya Geser Dasar (kN)	V_y	2154	908	965	786
	V_{max}	5207	1461	1667	2160
Simpangan (mm)	Δ_y	137	64	67	60
	Δ_{max}	420	120	133	194
Kinerja	μ	3.06	1.86	1.97	3.22
	Ω_0	2.42	1.61	1.73	2.75
	Energi Disipasi (kNm)	354	18	22	44



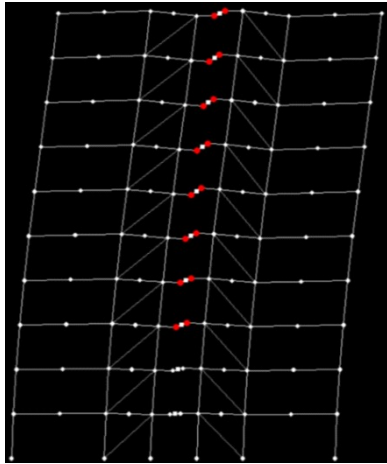
Gambar 9. Sendi plastis pada struktur LL 1

struktur LL1, LL2 dan LL3, dimana elemen-elemen struktur *core* lainnya tetap berperilaku elastik.

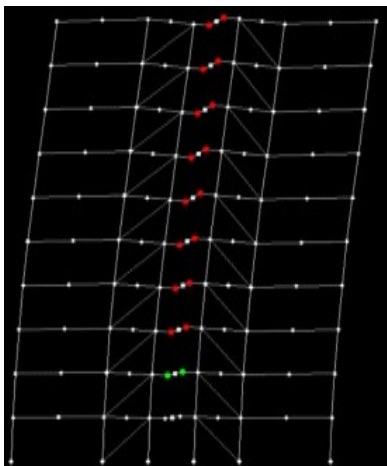
3.3 Kinerja struktur menggunakan link geser

Kinerja struktur *core* dengan pemasangan link yang berbeda tebal *web* (SH1, SH2 dan SH3) diamati dan dibandingkan dengan kinerja struktur *bench-mark* dengan ukuran kolom, balok, dan bresing yang sama.

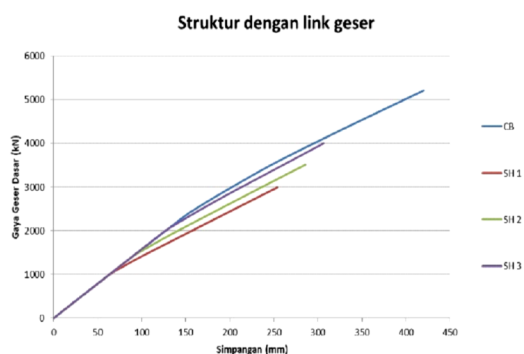
Gambar 12 menunjukkan perbandingan kurva *push-over* antara ketiga struktur (SH1, SH2, SH3) dengan struktur *bench-mark* (CB). Pemasangan link geser



Gambar 10. Sendi plastis pada struktur LL 2



Gambar 11. Sendi Plastis pada Struktur LL 3

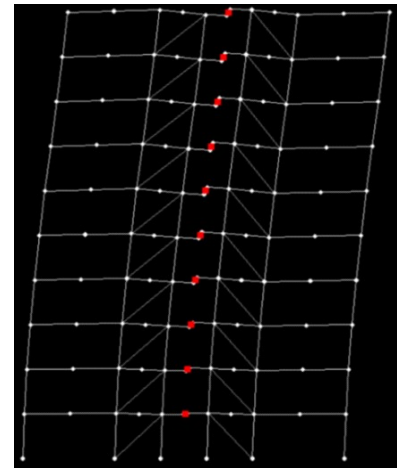


Gambar 12. Kurva push-over struktur dengan link geser WF150

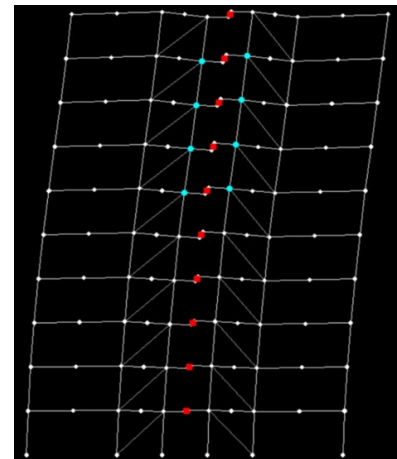
dengan dimensi yang lebih kecil dari dimensi balok perangkat tidak menunjukkan penurunan kekakuan, namun memberikan kekuatan yang lebih rendah walaupun tidak sejauh penurunan pada link lentur, karena ukuran panjang link geser yang lebih pendek. Kuat geser SH1 dengan ukuran tebal *web* (5 mm) dan *flange* (7 mm) yang sama dengan LL1, dan panjang sepertiga panjang link LL1, menunjukkan nilai kekuatan

Tabel 5. Kinerja struktur dengan link geser WF150

Struktur	CB	SH 1	SH 2	SH 3
Tebal <i>web</i> Link (mm)	-	5	7	10
Gaya Geser Dasar (kN)				
V_y	2154	931	1357	1995
V_{max}	5207	2988	3506	3994
Simpangan (mm)				
Δy	137	60	86	126
Δ_{max}	420	254	286	306
Kinerja				
μ	3.06	4.27	3.31	2.42
Ω_0	2.42	3.21	2.58	2.00
Energi Disipasi (kNm)	354.84	129.67	158.63	163.39



Gambar 13. Sendi plastis pada struktur SH 1

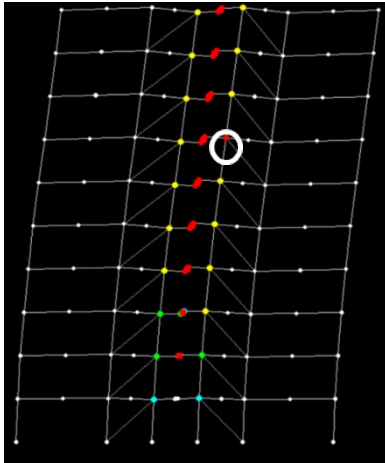


Gambar 14. Sendi plastis pada struktur SH 2

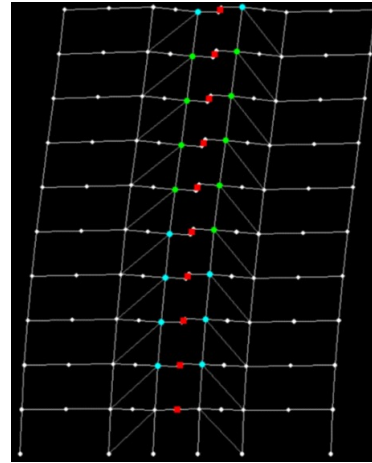
struktur *core*, $V_{max} = 2988$ kN atau 2,05 kali lebih besar daripada kekuatan *core* menggunakan link lentur LL1.

Tabel 5 menunjukkan penebalan *web* pada link menjadi 7 mm (140 %) dan 10 mm (200%) meningkatkan kekuatan geser struktur *core* menjadi 117% dan 134%.

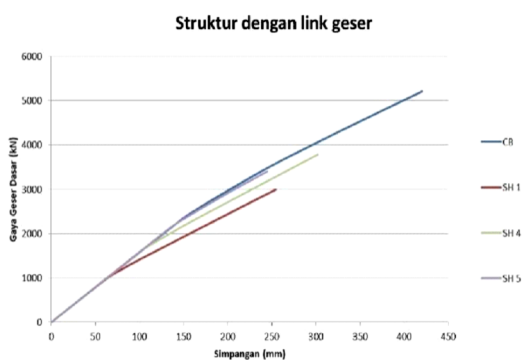
Gambar 13, 14 dan 15 menunjukkan pembentukan sendi plastis di ujung link pada akhir pembebanan struktur SH1, SH2, dan SH3.



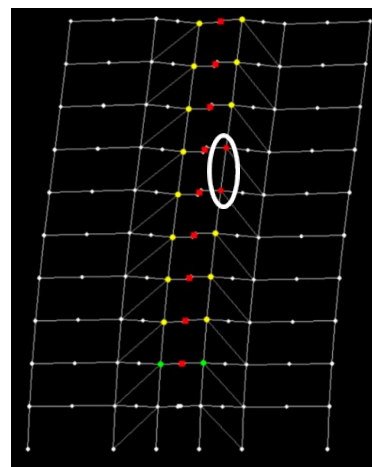
Gambar 15. Sendi plastis pada struktur SH 3



Gambar 17. Sendi plastis pada struktur SH 4



Gambar 16. Kurva push-over struktur dengan link geser WF150 dan WF200



Gambar 18. Sendi plastis pada struktur SH 5

Tabel 6. Kinerja struktur dengan link geser WF150 dan WF200

Struktur	CB	SH 1	SH 4	SH 5
Tinggi Link (mm)	-	150	200	200
Lebar Link (mm)	-	75	100	100
Tebal Web Link (mm)	-	5	6	8
Tebal Flange link (mm)	-	7	8	8
Gaya Geser Vy Dasar (kN)	2154	931	1597	2118
Vmax	5207	2988	3783	3400
Simpangan Δy (mm)	137	60	101	134
Δmax	420	254	302	245
μ	3.06	4.27	2.99	1.83
Kinerja Ω0	2.42	3.21	2.37	1.61
Disipasi Energi (kNm)	354.84	129.67	173.73	84.07

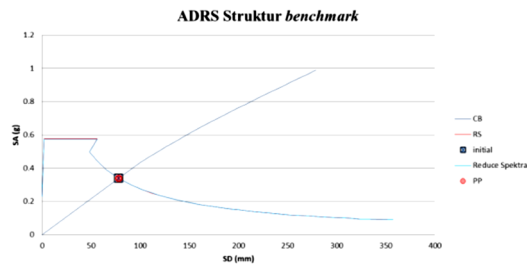
Perlu diperhatikan bahwa kekuatan maksimum struktur SH3 ditunjukkan dengan terjadinya sendi plastis pada ujung balok perangkai lantai 7 (**Gambar 15**) sementara link pada lantai 1 belum mengalami leleh; hal mana tidak terjadi pada struktur SH1 dan SH2. **Tabel 5** menunjukkan bahwa penebalan *web* pada link geser dapat meningkatkan kekuatan dan disipasi energi struktur *core*, namun cenderung mengurangi daktilitas, μ dan nilai kuat lebih struktur, Ω_0 . Penelaahan lebih

lanjut menunjukkan pada saat balok perangkai di lantai 7 leleh, kondisi leleh pada link di berbagai lantai masih dalam taraf awal kelelahan. **Gambar 12** menunjukkan kemiringan kurva push-over struktur SH3 masih cenderung mendekati kemiringan pada kondisi elastik.

Untuk memperoleh kekuatan struktur *core* yang mendekati kekuatan struktur *bench-mark* (CB), kajian dilanjutkan dengan memperbesar ukuran link geser dari WF 150.75.5.7 menjadi WF 200.100.6.8 (SH4), dan selanjutnya mempertebal web (SH5).

Gambar 16 dan **Tabel 6** masing-masing menunjukkan perbandingan kurva *push-over* dan kinerja antara kedua struktur (SH4, SH5) dengan struktur *bench-mark* (CB) dan struktur dengan ukuran link geser lebih kecil (SH1). Terlihat dengan jelas adanya peningkatan kekuatan geser V_{max} (126%) dan disipasi energi struktur *core* (SH4) akibat perbesaran dimensi link geser SH1. **Gambar 17** dan **18** menunjukkan pembentukan sendi plastis pada akhir pembebanan struktur *core* dengan dimensi link geser WF200.

Pembentukan sendi plastis pada struktur SH4 tidak berbeda dengan struktur SH1, dimana sendi plastis terjadi pada seluruh link pada struktur *core*. Namun,



Gambar 19. Performance point struktur benchmark

Tabel 7. Rekapitulasi data performance point

Str	Performance Point					Level kinerja
	sa (g)	sd (mm)	Δpp (mm)	Vpp (kN)	Drift $\Delta pp/H$ (%)	
CB	0.33	78	116	1823	0.29	IO
LL 1	-	-	-	-	-	-
LL 2	0.29	82	124	1564	0.31	IO
LL 3	0.28	83	125	1830	0.31	IO
SH 1	0.30	79	118	1622	0.29	IO
SH 2	0.32	78	117	1732	0.29	IO
SH 3	0.34	78	116	1830	0.29	IO
SH 4	0.33	78	116	1790	0.29	IO
SH 5	0.34	78	116	1843	0.29	IO

pada struktur SH5 dengan penebalan *web*, sendi plastis terbentuk juga pada balok perangkai di lantai 6 dan 7, sementara link pada lantai 1 masih dalam kondisi elastik. **Tabel 6** menunjukkan walaupun terjadi kenaikan pada kekuatan geser struktur V_{max} , namun tampak jelas terjadinya penurunan daktilitas dan energi disipasi yang signifikan pada struktur SH5 akibat terbentuknya sendi plastis pada balok perangkai yang menyebabkan kegagalan struktur *core*. Penelaahan lebih lanjut menunjukkan pada saat balok perangkai di lantai 6 dan 7 leleh, kondisi leleh pada link di berbagai lantai masih dalam taraf awal kelelahan. **Gambar 16** menunjukkan kemiringan kurva push-over struktur SH5 masih cenderung mendekati kemiringan pada kondisi elastik.

4. Kinerja Seluruh Struktur

4.1 Analisis non-linier statik

Hasil analisis non-linier statik dari seluruh struktur yang dikaji dengan analisis push-over menunjukkan pula kondisi struktur akibat gempa rencana, yang dinyatakan dalam *performance-point* untuk masing-masing struktur. **Gambar 19** menunjukkan *performance point* dari struktur *bench-mark*, sedangkan *performance-point* untuk seluruh struktur yang dikaji dapat dilihat pada **Tabel 7**. Hampir seluruh struktur menunjukkan level kinerja IO – *Immediate Occupancy*.

Perlu dicatat bahwa kajian numerik dilakukan terhadap struktur-struktur dengan dimensi penampang kolom, balok, bresing dan balok perangkai yang dirancang untuk struktur *core bench-mark*, tanpa link, dengan menggunakan parameter desain seismik untuk struktur

Tabel 8. Rekapitulasi hasil analisis riwayat waktu gempa imperial valley

Str	Drift		Energi Total (kNm)	Disipasi Energi	
	X (mm)	%		(kNm)	%
LL 1	-	-	-	-	-
LL 2	132	0.33	348	88.80	25.50
LL 3	140	0.35	386	109.70	28.40
SH 1	118	0.30	364	120.10	33.00
SH 2	131	0.33	379	75.82	20.00
SH 3	145	0.36	390	14.28	3.70
SH 4	134	0.34	382	48.87	12.80
SH 5	149	0.37	389	5.47	1.40

Tabel 9. Rekapitulasi hasil analisis riwayat waktu gempa Kocaeli

Str	Drift		Energi Total (kNm)	Disipasi Energi	
	X (mm)	%		(kNm)	%
LL 1	-	-	-	-	-
LL 2	-	-	-	-	-
LL 3	127	0.32	241	64.75	26.90
SH 1	113	0.28	230	71.79	31.20
SH 2	127	0.32	247	47.62	19.30
SH 3	137	0.34	263	8.43	3.20
SH 4	130	0.33	253	33.70	13.30
SH 5	138	0.35	264	2.16	0.80

rangka baja berpengaku eksentrik. Ketentuan lain terkait penggunaan link pada balok perangkai dan perubahan dimensi link, tidak diperhitungkan dalam merancang ulang struktur *core* mengingat belum ada ketentuan untuk merancang struktur *core* rangka baja dengan balok perangkai dan link.

4.2 Analisis non-linier dinamik

Evaluasi kinerja struktur dilakukan dengan analisis non-linier dinamik menggunakan dua rekaman data gempa (*Imperial Valley* dan *Kocaeli*) yang disesuaikan dengan respon spektra kota Jakarta. Hasil analisis menggunakan PERFORM-3D seperti ditunjukkan dalam **Tabel 8** dan **9** menunjukkan konsistensi antara respon struktur-struktur *core* yang dikaji terhadap kedua gempa tersebut.

Struktur SH3 dan SH5 menunjukkan disipasi energi yang sangat rendah akibat kedua gempa, dibandingkan dengan struktur *core* lainnya. Hal ini sejalan dengan kondisi kelelahan yang diamati pada analisis non-linier statik, dimana hampir seluruh link pada struktur SH3 dan SH5 masih dalam taraf kelelahan awal.

5. Kajian Eksperimental

5.1 Set up pengujian

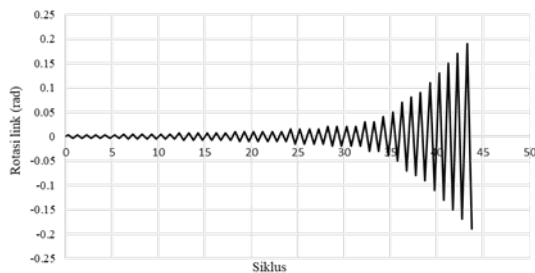
Pengaruh penambahan tebal web pada link geser terhadap kapasitas sistem *core* rangka baja dengan balok perangkai diverifikasi dengan melakukan uji *half-*



Gambar 20. Setup Pengujian

Tabel 10. Elemen pengujian

Elemen	Elemen Half Scale
Link -1	W 150.75.6.8
Link -2	W 150.75.8.8
Balok Perangkai	W 400.200.8.13
Kolom	W 350.350.12.19



Gambar 21. Protokol pembebanan

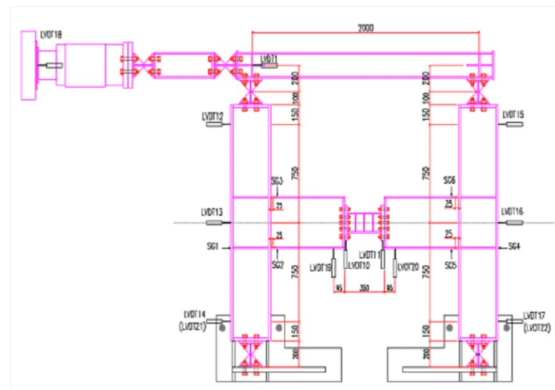
scale pada sistem *core* rangka baja seperti ditunjukkan pada **Gambar 20**.

Respon struktur diamati melalui besarnya deformasi dan gaya dalam pada elemen link, balok perangkai dan kolom (yang merepresentasikan *core* rangka baja yang cukup kaku), yang berupa penampang WF seperti ditunjukkan pada **Tabel 10**.

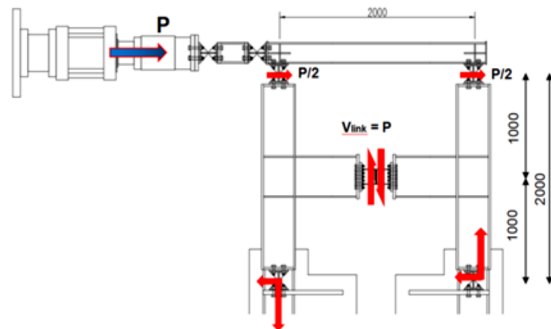
Dua buah elemen link yang dapat diganti terbuat dari baja A36 dengan ketebalan web yang berbeda (6 mm dan 8 mm) disambung ke balok perangkai melalui pelat ujung dengan 15 buah baut F10T berdiameter 16mm. Pembebanan dilakukan dengan kontrol perpindahan sesuai dengan protokol pembebanan yang ditentukan SNI 7860-2015 seperti ditunjukkan dalam **Gambar 21**.

Pengamatan terhadap respon struktur dilakukan melalui pembacaan *Linier Variable Displacement Transducers* (LVDT) dan *strain gauge/rosette* paska leleh berukuran 2mm, yang dipasang pada elemen-elemen struktur *core* seperti terlihat pada **Gambar 22**.

Dengan memperhatikan keseimbangan momen pada struktur uji pada **Gambar 23**, dapat ditunjukkan bahwa besarnya gaya geser yang bekerja di tengah bentang link (V_{link}) sama dengan gaya aktuator, P .



Gambar 22. Posisi LVDT dan strain gauge



Gambar 23. Keseimbangan gaya pada pengujian

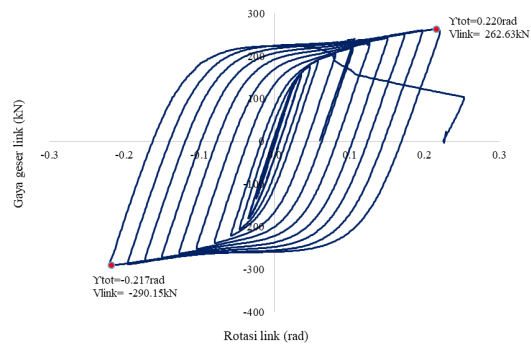
Tabel 11. Hasil uji tarik

Benda Uji	Lokasi (MPa)	F_{ye} (MPa)	F_{ue}	ϵ_u	R_t	R_u	F_{ye}/F_{ue}
Link-1	Web	367	457	0.37	1.53	1.23	0.81
	Flange	356	478	0.29	1.49	1.29	0.75
Link-2	Web	359	474	0.31	1.50	1.28	0.76
	Flange	356	478	0.29	1.49	1.29	0.75

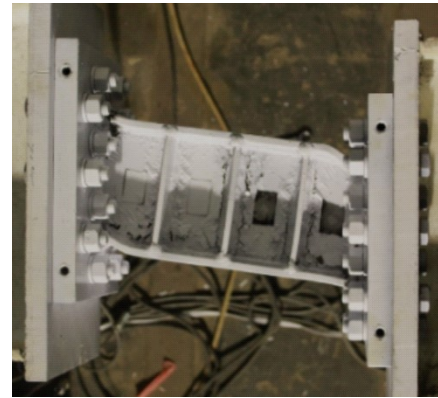
Hasil uji tarik elemen link pada **Tabel 11** menunjukkan bahwa elemen link memenuhi persyaratan SNI 7860-2015 dan AISC 341-2016.

5.2 Hasil pengujian siklik

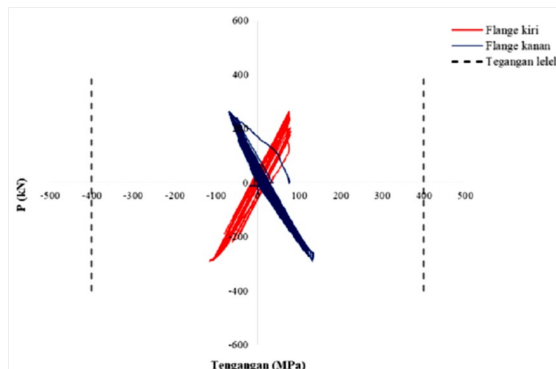
Pengujian pada *Link-1* dilakukan sampai spesimen *link* mengalami fraktur dengan rotasi link total mencapai 0.22 rad. dan simpangan kontrol mencapai 2.7% atau senilai dengan perpindahan sebesar 53.3 mm pada LVDT12 yang ditempatkan pada kolom kiri (atas). Kuat geser maksimum pada *Link-1* untuk bagian tekan tercatat sebesar 262.6 kN dan sebesar 290.15 kN untuk bagian tarik.



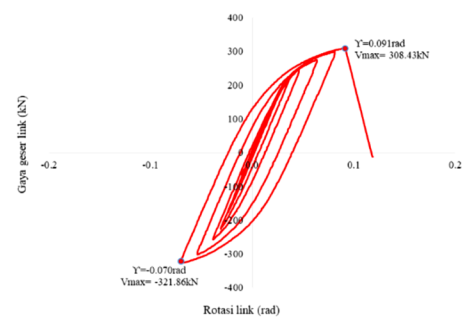
Gambar 24. Gaya geser link vs rotasi total link-1



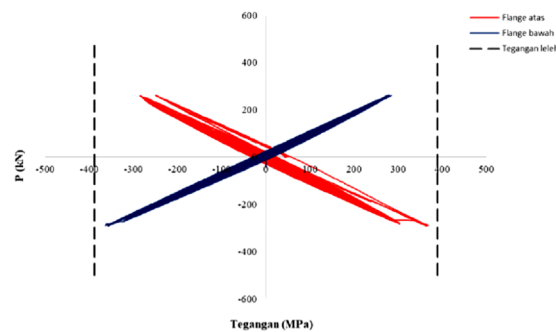
Gambar 27. Deformasi akhir link-1



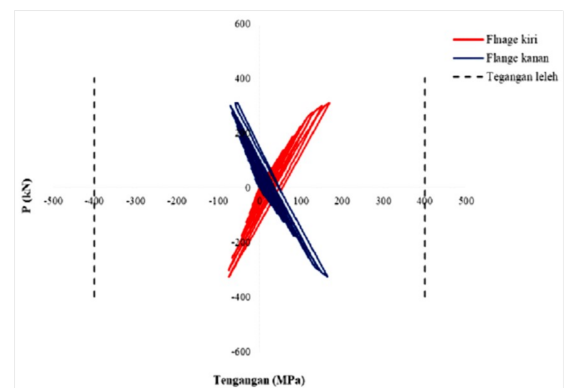
Gambar 25. Tegangan pada kolom (link-1)



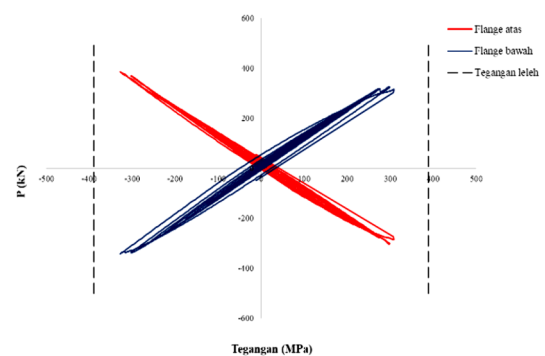
Gambar 28. Gaya geser vs rotasi total link-2



Gambar 26. Tegangan pada balok perangkai (link-1)



Gambar 29. Tegangan pada kolom (link-2)



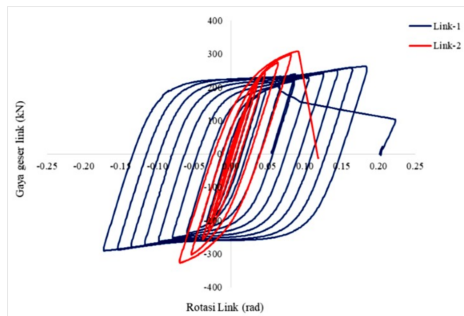
Gambar 30. Tegangan pada balok perangkai (link-2)

Pada saat link mencapai kuat geser maksimum tersebut, pencatatan regangan pada *strain-gauge* di balok perangkai maupun kolom masih menunjukkan kondisi elastik linier. Hal ini ditunjukkan pula dengan besarnya tegangan yang masih linier akibat beban siklik aktuator, P pada balok perangkai dan kolom (Gambar 25 dan 26).

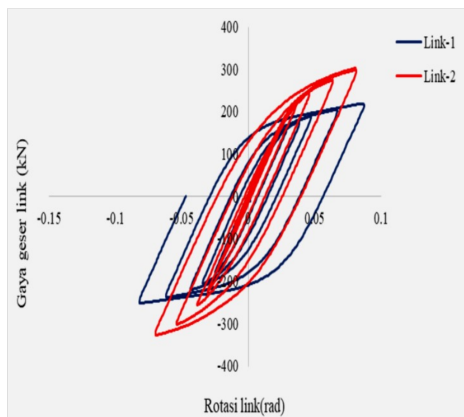
Berbeda dengan pengujian *Link-1* yang berakhir sampai dengan *link* mencapai fraktur, pengujian *Link-2* terpaksa dihentikan karena terjadi kegagalan pada set-up pengujian ketika sendi pada salah satu ujung kolom mengalami fraktur, yaitu pada saat rotasi total mencapai 0.09 rad menuju beban puncak tekan. Pada saat ini LVDT 12 di ujung kolom mencatat perpindahan sebesar 23.65 mm atau rasio simpangan (*drift*) sebesar 1,36% dan gaya geser pada *Link-2* tercatat sebesar 308,43 kN (tekan) dan 321,86 kN (tarik).



Gambar 31. Deformasi akhir link-2



Gambar 32. Respon link-1 dan link-2



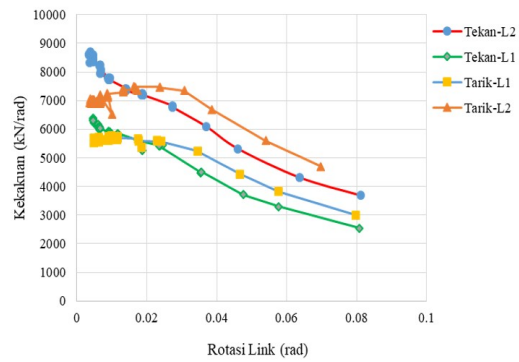
Gambar 33. Respon link mencapai rotasi 0,08 rad

Pencatatan strain-gauge pada kolom dan balok perangkai menunjukkan belum terjadi kelelahan baik pada kolom maupun balok perangkai, seperti terlihat pada Gambar 29 dan 30.

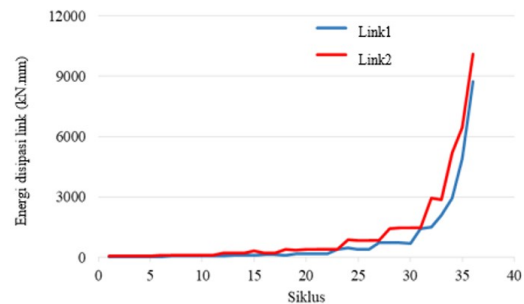
5.3 Pembahasan

Gambar 32 menunjukkan respon kedua link terhadap pembebanan siklik. Seperti ditunjukkan sebelumnya, gaya geser yang dialami Link-2 pada saat pembebanan dihentikan masih lebih besar daripada gaya geser maksimum pada saat Link-1 mengalami kegagalan.

Pembahasan selanjutnya difokuskan pada kinerja Link-1 dan Link-2 sampai pembebanan mencapai rotasi link sebesar 0.08 rad seperti terlihat pada Gambar 33.



Gambar 34. Degradasi kekakuan link



Gambar 35. Energi disipasi link

Tabel 12. Kekakuan dan disipasi energi pada rotasi link 0,08 rad

Kondisi	Kekakuan	Disipasi Energi
	kN/rad	kN.mm
Link-1 Tekan	2.543	8.731
Link-1 Tarik	2.996	
Link-2 Tekan	3.681	10.101
Link-2 Tarik	4.695	

Gambar 34 menunjukkan degradasi kekakuan link yang dialami selama pembebanan siklik hingga mencapai rotasi link sebesar 0.08 rad. Terlihat bahwa kedua link mengalami kecenderungan penurunan kekakuan yang serupa, namun dengan nilai kekakuan yang lebih besar pada Link-2, baik untuk kondisi tarik maupun tekan.

Peningkatan disipasi energi pada kedua link selama pembebanan siklik ditunjukkan dalam Gambar 35. Terlihat bahwa untuk setiap siklus, disipasi energi pada Link-2 selalu lebih besar daripada Link-1.

Tabel 12 menunjukkan perbandingan besarnya kekakuan dan energi disipasi yang dialami kedua link hingga pembebanan siklik mencapai rotasi link sebesar 0.08 rad. Link-2 dengan *web* setebal 8 mm, atau 33% lebih tebal daripada Link-1, mendisipasi energi 15% lebih besar daripada Link-1. Dengan memperhatikan gaya geser dan kekakuan yang lebih besar dibandingkan dengan Link-1 pada rotasi 0.08 rad, peningkatan disipasi energi pada Link-2 diperkirakan akan semakin lebih besar pada saat Link-2 mengalami fraktur.

6. Kesimpulan

Dari kajian yang telah dilakukan terhadap beberapa model struktur *core* rangka baja dengan balok perangkai dan link yang dapat diganti, dapat disampaikan kesimpulan sebagai berikut:

1. Peningkatan kinerja struktur *core* rangka baja dengan balok perangkai dan link yang dapat diganti, berupa peningkatan kekakuan, kekuatan dan disipasi energi, dapat dilakukan dengan penebalan *flange* (untuk link lentur) dan penebalan *web* (untuk link geser), tanpa menyebabkan kelelahan pada elemen struktur *core* lainnya.
2. Penggunaan link geser dengan tebal *web* yang berlebihan atau link lentur dengan penebalan *flange* yang berlebihan dapat mengurangi kinerja struktur *core* karena lelehnya balok perangkai, sementara sebagian besar link masih dalam taraf awal kelelahan.
3. Kajian eksperimental menunjukkan link geser yang telah efektif mendisipasi energi hingga hancur, dapat dengan mudah diganti tanpa merusak elemen struktur *core* lainnya yang masih tetap berperilaku elastik.
4. Pemasangan link geser pada struktur *core* rangka baja dengan balok perangkai akan mengurangi kekuatan geser struktur terhadap beban gempa. Namun, dengan penebalan *web* pada link yang dapat diganti akan dapat meningkatkan kinerja dan nilai ekonomis struktur tahan gempa menggunakan sistem *core*.

Daftar Pustaka

- American Institute of Steel Construction (2016) "Specification for Structural Steel Buildings (AISC 360-16)". AISC, Illinois.
- American Institute of Steel Construction (2016) "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (AISC 341-16)". AISC, Illinois.
- Badan Standardisasi Nasional (2019) "Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural (SNI 1729-2019)". BSN, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional (2019) "Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung (SNI 1726-2019)". BSN, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional (2019) "Ketentuan Seismik Untuk Struktur Bangunan Gedung Baja (SNI 7860-2015)". BSN, Jakarta.
- Bruneau, M., Uang, C., Sabelli, R. (2011) "Ductile Design of Steel Structures 2nd Edition". McGraw-Hill, New York.
- Dewobroto, W. (2006). "Evaluasi Kinerja Struktur Baja Tahan Gempa dengan Analisa Pushover. Civil Engineering National Conference : Sustainability Construction & Structural Engineering Based on Professionalism ", Jurnal Teknik Sipil, Vol. 3, No. 1
- Federal Emergency Management Agency (2000) "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356)". FEMA, Washington D. C.
- Hjelmstad, K.D. and Popov, E.P. (1983). "Cyclic Behavior and Design of Link Beams, "ASCE Journal of Structural Engineering, 109(10), pp. 2387-2403.
- Kasai, K. and Popov, E.P. (1986). "General Behavior of WF Steel Shear Link Beams. Journal of Structural Engineering", ASCE, Vol. 112, No. 2
- Kusumastuti, D., et al. (2018) "Analytical Investigation of the Applicability of Seismic Devices for Core Frames System in High-Rise Buildings", Regional Conference in Civil Engineering, AUN-SEED Net, Surabaya.
- Moestopo, M. et al. (2018) "Experimental Study on the Seismic Behavior of Replaceable Shear Links Connected to Coupling Beam", International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology, Vol.8 No.2, pp.532-539

