

Kajian Eksperimental Peningkatan Kinerja Link Geser pada Sistem Rangka Baja Berpengaku Eksentrik

Muslinang Moestopo

Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan/
Pusat Rekayasa Industri-Laboratorium Mekanika Struktur
Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No. 10 Bandung, 40132, E-mail: mmoestopo@gmail.com

M. Arief Rahman Panjaitan

Alumni Program Magister (S2) Rekayasa Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa No. 10 Bandung, 40132, E-mail: m.ariefrahmanpanjaitan@yahoo.com

Abstrak

Link geser pada sistem rangka baja berpengaku eksentrik (SRBE) merupakan elemen utama penyerap energi gempa yang direncanakan mengalami leleh pada seluruh pelat badannya. Kinerja link geser dengan sambungan baut yang berkurang akibat terjadinya kegagalan pada pelat sayap, diperbaiki dengan dua cara: (1) memperlebar pelat sayap pada bagian ujung link, dan (2) meningkatkan mutu pelat sayap. Kajian eksperimental dilakukan terhadap tiga buah link geser yaitu link bench-mark, link dengan pelebaran sayap, dan link dengan peningkatan mutu pelat sayap. Pembebanan siklik secara kuasi-statik dengan kontrol perpindahan dilakukan terhadap ketiga spesimen link hingga mencapai keruntuhan. Kurva histeretik yang dihasilkan menunjukkan peningkatan kinerja yang signifikan pada kedua upaya perbaikan, meliputi: kekuatan, daktilitas, dan disipasi energi.

Kata-kata Kunci: *Link geser, pelat sayap, mutu baja, kekuatan, daktilitas, energi disipasi.*

Abstract

Shear link of the eccentrically braced steel frames is the major seismic energy dissipating element which is expected to yield in its entire web. The decreasing performance of bolt-connected shear link due to failure of its flange, is improved by two methods: (1) widening the flange at link ends, and (2) increase the grade of flange. Experimental work was carried out on bench-mark link, link with wing plate, and link with flange of higher grade. Series of quasi-static cyclic loading with displacement control were applied to each link until its failure. Hysteretic curve shows increasing performance by both improvement methods, which includes: strength, ductility, and energy dissipation.

Keywords: *Shear link, wing plate, steel grade, strength, ductility, energy dissipation.*

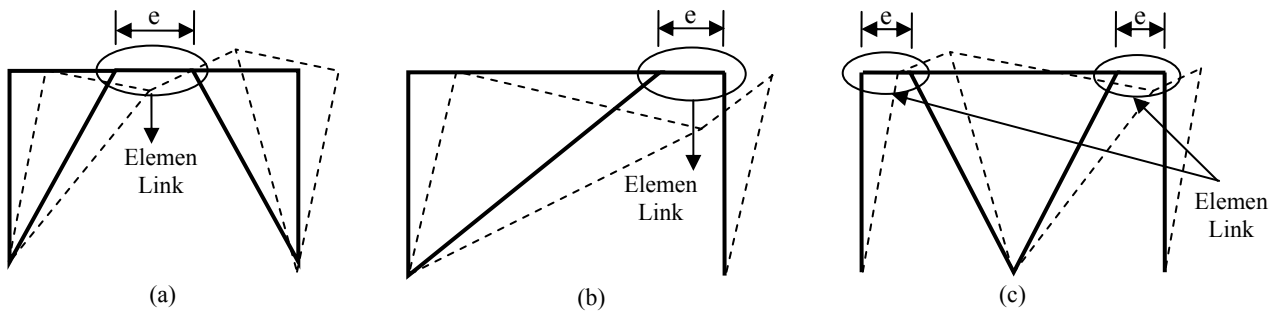
1. Pendahuluan

Sistem Rangka Baja Berpengaku Eksentrik (SRBE) merupakan sistem struktur pemikul beban gempa yang memiliki kinerja yang baik dalam hal kekuatan, kekuatan, daktilitas, maupun disipasi energi. Elemen yang memegang peranan penting pada SRBE adalah elemen link yang berfungsi menyerap energi gempa melalui mekanisme leleh, yang dapat berupa leleh geser atau leleh lentur.

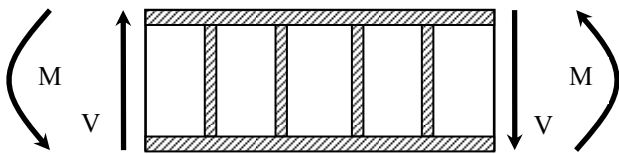
Link pada SRBE berupa elemen yang berperilaku sebagai balok pendek yang pada kedua sisinya bekerja gaya geser sama besar dengan arah yang berlawanan serta momen dengan besar dan arah yang sama, seperti terlihat pada **Gambar 2**.

Mekanisme leleh yang terjadi pada link dapat berupa terbentuknya sendi plastis pada kedua ujung link akibat tercapainya momen sebesar M_p (momen plastis penampang link) dan disebut link lentur, atau berupa terjadinya leleh pada pelat badan link akibat tercapainya gaya geser sebesar V_p (gaya geser plastis penampang link) dan disebut link geser.

Kinerja struktur yang telah terkena gempa akan berkurang akibat rusaknya link, yang membahayakan jika struktur tersebut mengalami kejadian gempa berikutnya. Penggantian link menjadi tidak mudah dilakukan bila link merupakan satu kesatuan dengan balok dan/atau kolom melalui sambungan las. Sejumlah kajian telah dilakukan terhadap penggunaan link dengan sambungan baut, sebagai link yang dapat diganti (*replaceable link*).



Gambar 1. Jenis - jenis SRBE : (a) Tipe Split K Brace (b) Tipe D Brace (c) Tipe V Brace



Gambar 2. Gaya-gaya dalam pada link SRBE

Gobarah dan Ramadan (1994) mengkaji kinerja sambungan link – kolom dengan baut dan pelat ujung tipe extended. Benda uji dimodelkan sebagai link pada SRBE tipe D, yang diuji di laboratorium dengan pembebanan siklik. Hasil kajian menunjukkan:

- Link dengan sambungan kaku memikul gaya dalam yang lebih tinggi dan dapat menyerap energi lebih banyak daripada link dengan sambungan fleksibel.
- Sambungan baut–pelat ujung tipe extended sebaiknya direncanakan untuk selalu berperilaku elastis, walaupun memikul beban yang mengakibatkan deformasi inelastik link yang sangat besar.

Stratan dan Dubina (2004) melakukan kajian serupa terhadap beberapa spesimen link dengan sambungan baut – pelat ujung tipe flush untuk digunakan pada SRBE tipe split K. Pengujian dilakukan dengan membebani link secara siklik sampai mencapai kegagalan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa link yang lebih pendek menunjukkan kinerja yang lebih baik, berupa kekuatan yang lebih tinggi dan perilaku histeresis dan penyerapan energi yang lebih baik tanpa terjadinya efek pinching yang signifikan, yang dapat memicu degradasi kekakuan dan kekuatan. Penurunan kekuatan ini disebabkan oleh rusaknya baut akibat mengalami gaya tarik pada link yang lebih panjang.

Moestopo dan Mirza (2006) melakukan kajian ekperimental terhadap link pendek atau link geser dengan sambungan baut yang direncanakan untuk SRBE bangunan ruko tiga lantai dengan bresing tipe split-K. Pembebanan siklik dilakukan dengan kontrol perpindahan sampai link mengalami kegagalan. Hasil kajian menunjukkan fenomena pinching pada kurva histeresis dapat diperbaiki dengan menggunakan ukuran diameter baut yang lebih besar, untuk mencegah semakin lebarnya bukaan antar pelat yang disambung pada saat baut mengalami tarik.

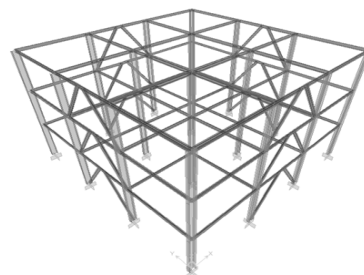
Hasil kajian lanjut yang dilakukan oleh Moestopo dkk (2008) menunjukkan pembesaran ukuran tebal pelat ujung link dan diameter baut secara signifikan meningkatkan kinerja link geser dengan sambungan baut, terutama dalam hal daktilitas dan disipasi energi. Namun demikian, pengamatan menunjukkan terjadinya kegagalan fraktur dan tekuk pada pelat sayap bagian ujung yang mengurangi efektifitas kinerja link geser dalam menyerap energi. Upaya perbaikan yang diusulkan adalah dengan memperlebar ukuran sayap (*wing plate*) di bagian ujung link, untuk mengurangi besarnya tegangan tarik maksimum akibat momen pada ujung link. Dengan demikian, kegagalan prematur pada pelat sayap dapat dihindari dan penyebaran leleh dapat terjadi di pelat badan sepanjang link.

Makalah ini menyajikan hasil kajian ekperimental terhadap upaya peningkatan kinerja link geser terhadap kemungkinan kegagalan pada pelat sayap link, yaitu dengan meningkatkan mutu pelat sayap dan menambah pelebaran pelat sayap pada kedua ujung link.

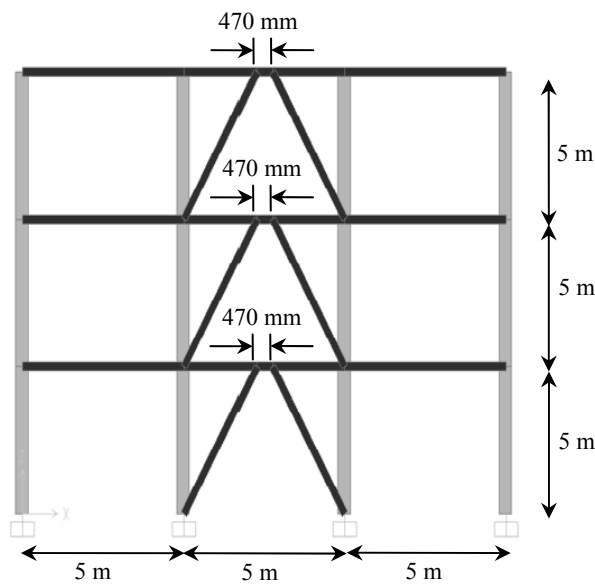
2. Kajian Eksperimental

2.1 Desain link geser

Kinerja link geser yang ditinjau dalam kajian ini adalah kinerja link yang direncanakan untuk struktur bangunan ruko 3 lantai berukuran 15 meter x 15 meter, yang berlokasi di kota Bandung (Zona Gempa 3), dengan menggunakan Struktur Rangka Berpengaku Eksentrik seperti terlihat pada **Gambar 3**. Perencanaan elemen link dilakukan mengikuti ketentuan pembebanan akibat gempa (SNI 03-1726-2002) dan ketentuan perencanaan struktur baja (SNI 03-1729-2002), khususnya untuk Struktur Rangka Berpengaku Eksentrik. Dengan bantuan perangkat lunak, diperoleh desain link terbuat dari penampang IWF 200x100x6,5x8.



Gambar 3. Pemodelan SRBE tipe split K



Gambar 4. Model struktur rangka baja dengan link geser

2.2 Benda uji

Kajian eksperimental dilakukan terhadap tiga buah benda uji link, yaitu: link acuan, berupa link tersusun (*built-up*), link dengan pelebaran pelat sayap (*wing-plate*), dan link yang terbuat dari pelat sayap dengan mutu lebih tinggi (*hibrid*). Uji tarik dilakukan mengikuti standar JIS Z2201 terhadap dua jenis bahan pelat baja untuk mengetahui karakteristik material yang akan digunakan dalam mendesain elemen link.

Link geser yang menjadi acuan dalam kajian ini berupa link *built-up* berbentuk H, yang tersusun dari pelat sayap dan pelat badan dengan mutu yang sama, dan disambung dengan las.

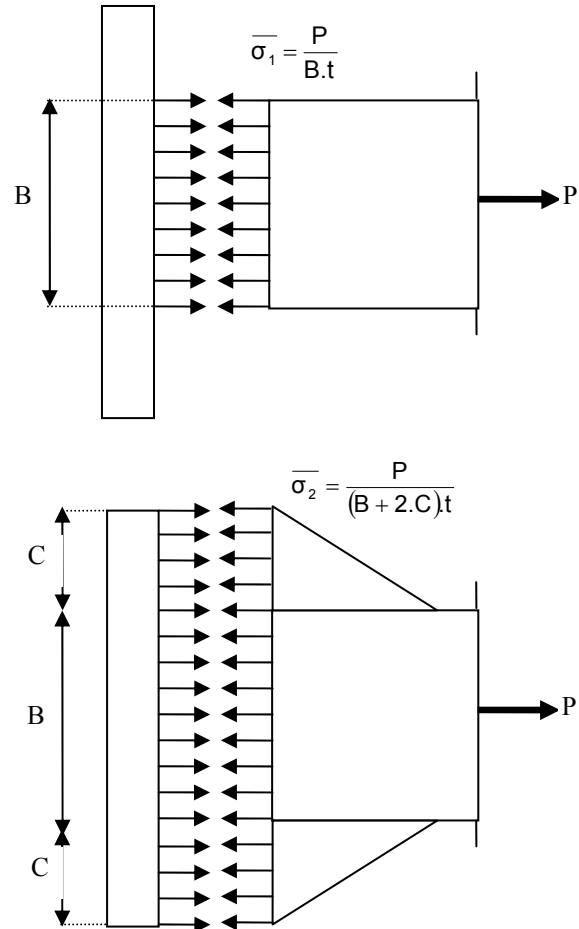
Link *wing plate* dibentuk dengan menambahkan pelebaran pelat sayap pada kedua ujung link dengan maksud mengurangi besarnya tegangan pada pelat sayap guna menghindari kegagalan akibat fraktur pelat sayap. Gambar 5b menunjukkan pengurangan besarnya tegangan σ_2 akibat pelebaran pelat sayap sepanjang $2C$.

Tabel 1. Hasil uji tarik

Properti	Baja A	Baja B
Tegangan Leleh (MPa)	330	398
Tegangan Tarik (MPa)	455	544
Modulus Elastisitas (MPa)	216.976	231.079

Tabel 2. Data properti benda uji

Benda Uji	Pelat Sayap	Pelat Badan
Link <i>built-up</i>	Baja A	Baja A
Link <i>wing plate</i>	Baja A	Baja A
Link hibrid	Baja A	Baja B

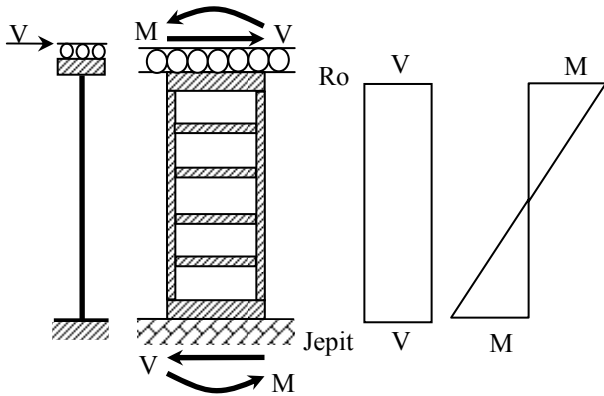


Gambar 5. Tegangan pada pelat sayap (tampak atas): (a) Tanpa *wing-plate*; (b) Dengan *wing-plate*

Link *hibrid* dibentuk dari dua jenis baja yang berbeda mutunya. Pelat badan yang terbuat dari baja dengan mutu sama dengan link acuan (*link built-up*), disambung dengan las pada kedua pelat sayap yang terbuat dari baja dengan mutu lebih tinggi. Peningkatan mutu pelat sayap dimaksudkan untuk memperlambat terjadinya leleh yang berpotensi pada kegagalan pada pelat sayap, sekaligus meningkatkan pelebaran secara merata pada seluruh pelat badan.

2.3 Set up pengujian

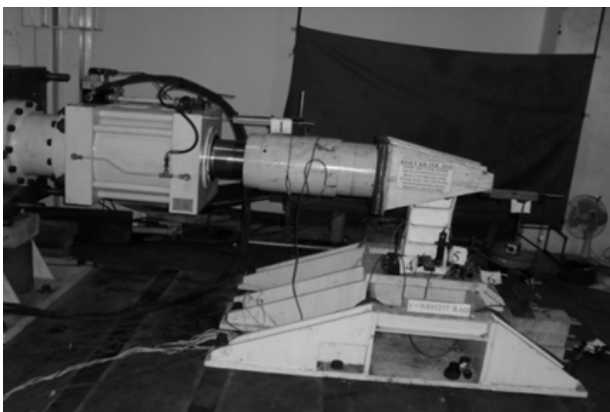
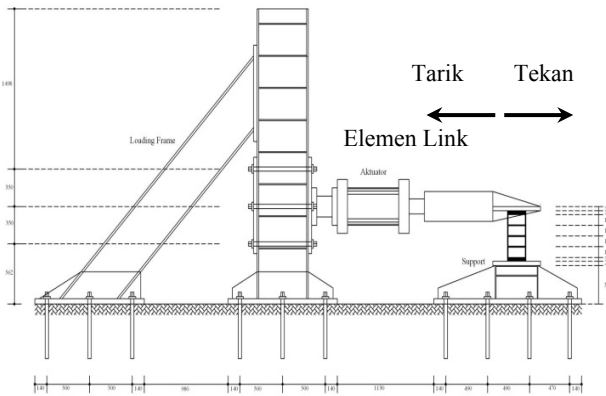
Pengujian terhadap kinerja link geser dilakukan terhadap benda uji berupa link geser yang kedua ujungnya dimodelkan dapat memikul momen. Salah satu ujungnya berupa jepit sedangkan ujung lainnya dapat berpindah mengikuti arah gaya terpusat yang bekerja bolak-balik pada arah tegak lurus sumbu link (Gambar 6). Perpindahan ini akan menimbulkan momen ujung yang searah dan gaya geser yang berlawanan arah pada kedua ujung link. Kedua ujung link berupa pelat ujung yang disambung dengan baut dan direncanakan berperilaku seperti yang dimodelkan.



Gambar 6. Pemodelan benda uji link geser

Set up pengujian benda uji di laboratorium dilakukan sesuai dengan pemodelan link geser (Gambar 6 dan 7) dengan menghubungkan salah satu ujung benda uji dengan tumpuan pada *strong-floor*, dan ujung lainnya dengan aktuator Dartec yang bekerja dengan gerakan tarik-tekan dalam arah tegak lurus sumbu link

Berdasarkan hasil studi sebelumnya yang dilakukan oleh Moestopo dan Mirza (2006) dan Novan (2008), link disambung menggunakan baut berdiameter besar (25mm) dan pelat yang tebal (30mm) dengan maksud menghindari fenomena pinching pada kurva histeresis akibat lelehnya baut dan menghindari terjadinya kinking pada pelat ujung.



Gambar 7. Set up pengujian

Pengamatan perpindahan dilakukan melalui bacaan pada aktuator dan pada LVDT yang dipasang di ujung atas link yang dibebani, sedangkan *strain gauge* dan *rossette* dipasang masing-masing pada pelat sayap dan pelat badan untuk mengamati perubahan regangan yang terjadi selama pengujian.

2.4 Pengujian pembebanan

Pembebanan diberikan melalui aktuator pada ujung atas link berupa perpindahan siklik quasi statik yang diatur mengikuti pola pembebanan yang ditunjukkan dalam Gambar 8.

Pencatatan dilakukan selama pembebanan terhadap besarnya beban yang bekerja, perpindahan ujung atas link, dan regangan pada link, yaitu regangan aksial pada pelat sayap dan regangan geser pada pelat badan link.

Pembebanan dihentikan ketika terjadi penurunan bacaan beban puncak pada siklus pembebanan, yang akan ditunjukkan pula oleh kegagalan yang terjadi pada benda uji.

3. Hasil Pengujian dan Pembahasan

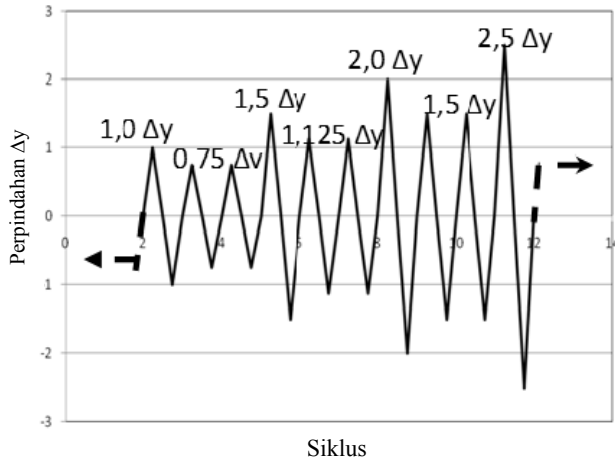
3.1 Kurva histeresis beban - perpindahan

Hasil pengujian terhadap ketiga benda uji: link acuan, link wing plate, dan link hibrid, menunjukkan perilaku yang hampir sama pada zona elastik. Dengan mengacu kepada besarnya tegangan leleh pada pelat badan hasil uji tarik sebesar $f_y = 330$ MPa, diperoleh besarnya perpindahan leleh, δ_y pada ketiga benda uji masing-masing, $d_1 = 3,36$ mm, $\delta_{y2} = 3,35$ mm, dan $\delta_{y3} = 3,31$ mm. Kekakuan elastik ketiga benda uji yang relatif sama terlihat dari garis lurus yang berimpit pada kurva ketiga benda uji (Gambar 10 a dan b).

Gambar 10 menunjukkan perbandingan antara kurva histeresis yang dihasilkan oleh ketiga benda uji akibat pola pembebanan siklik yang sama, dengan beban puncak masing-masing adalah 261,07 kN, 297,42 kN, dan 278,23 kN, dan perpindahan maksimum masing-masing sebesar 21,45 mm, 23,10 mm, dan 26,40 mm (Tabel 3).

Dari hasil kurva histeretik yang diperoleh dari ketiga benda uji, tampak jelas tidak terjadi fenomena pinching, hal mana menunjukkan kinerja pelat sambung dan baut yang cukup baik terhadap beban siklik yang diterima.

Gambar 10 a dan b menunjukkan bahwa penambahan lebar pelat sayap (*wing plate*) dan peningkatan mutu baja pelat sayap (*hibrid*), menghasilkan peningkatan kekuatan link dan sekaligus peningkatan daktilitas link, dibandingkan dengan benda uji acuan (*buit-up*). Gambar 10 c dengan jelas memperlihatkan posisi ketiga envelope kurva histeresis pada saat perpindahan mencapai 21,45 mm, yaitu perpindahan maksimum link acuan.

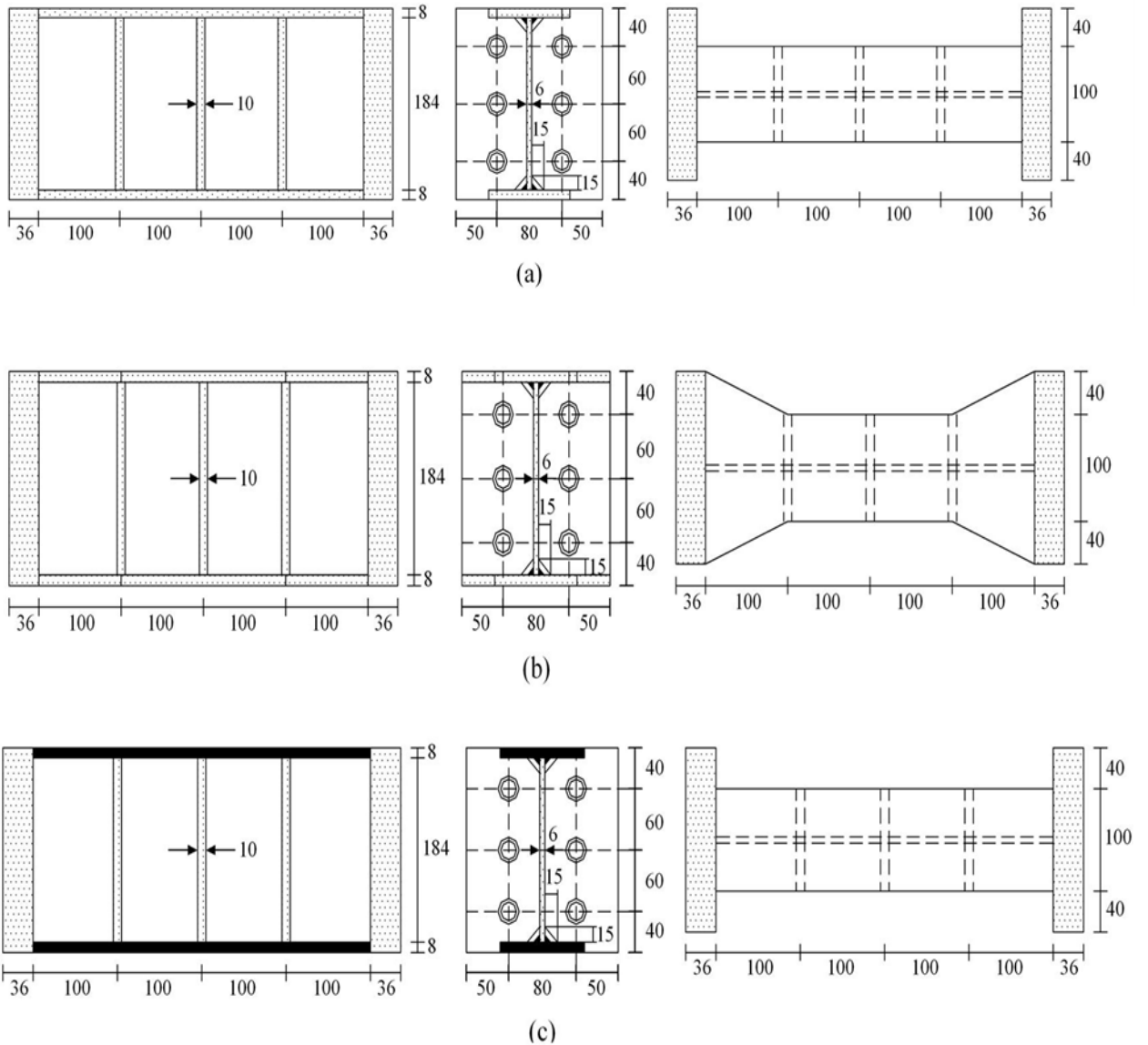


Gambar 8. Siklus quasi statik inelastik

3.2 Kondisi kegagalan

Akibat pembebanan siklik yang dilakukan, dapat diamati terjadinya mekanisme kerusakan dan kegagalan yang berbeda pada ketiga benda uji. **Tabel 3** menunjukkan sejumlah besaran parameter yang tercatat dan dihitung pada saat ketiga benda uji sudah memasuki fase kerusakan yang cukup besar, yaitu pada saat perpindahan mencapai $6 \delta_y$ dan pada saat masing-masing benda uji mencapai perpindahan maksimumnya δ_u .

Hasil pengamatan visual menunjukkan pula perbedaan mekanisme kegagalan pada ketiga benda uji link. **Gambar 11a** memperlihatkan kegagalan link *built-up* yang diawali dengan fraktur pada pelat sayap bagian ujung akibat tegangan tarik yang berlebihan, seperti



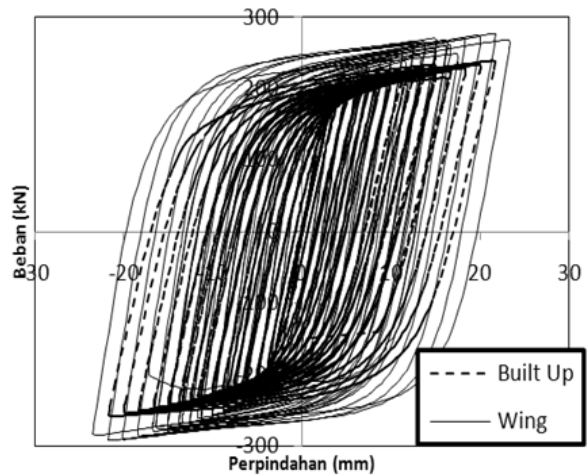
Gambar 9. Spesimen link (tampak samping, melintang, dan atas): (a) *Link built-up* (b) *Link wing plate* (c) *Link hibrid*

yang ditunjukkan oleh Novan (2008) dan Moestopo dkk (2008). Kegagalan ini dipicu oleh adanya tegangan tarik sisa akibat pengelasan. Selanjutnya, regangan geser pada pelat badan semakin meningkat hingga mencapai $\gamma_{xy} = 6,8\%$ (Tabel 7), yang kemudian diikuti oleh fraktur. Sementara itu, harga regangan geser pada pelat badan panel tengah masih tercatat rendah, $\gamma_{xy} = 0,52\%$. Hal ini menunjukkan distribusi tegangan yang kurang merata pada pelat badan dari panel ujung ke panel tengah.

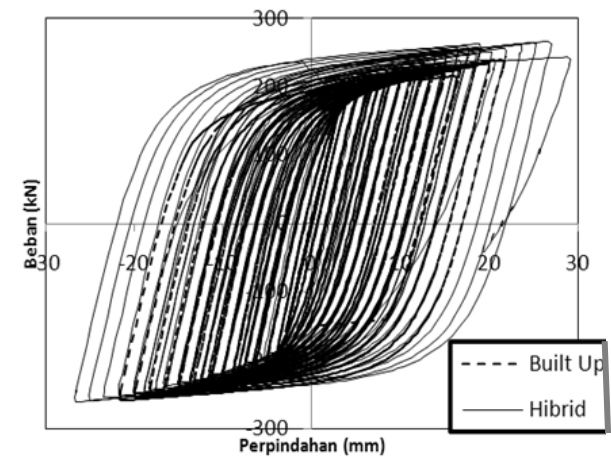
Pada link dengan *wing-plate*, mekanisme kegagalan terjadi pada saat pelat badan pada panel tengah mengalami fraktur (Gambar 12), sementara tidak terjadi fraktur pada seluruh pelat sayap. Hal ini menunjukkan efektifitas penambahan wing plate dalam menyebarkan tegangan geser lebih merata pada seluruh pelat badan link geser.

Tabel 3. Parameter pada kondisi link rusak

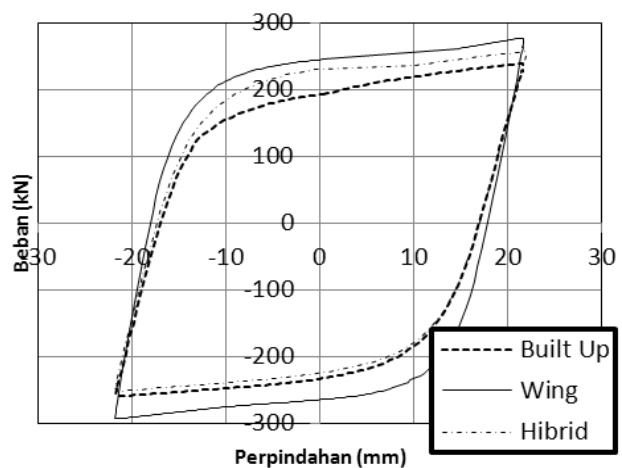
Jenis Link	Parameter yang Diamati	Kondisi Aktuator	Pada Perpindahan (δ)	
			6.5 δ_y	δ_u
Built Up	Gaya (kN)	Tarik	228,96	244,23
		Tekan	-251,10	-261,07
	Perpindahan (mm)	Tarik	19,80	21,45
		Tekan	-19,80	-21,45
	γ Panel Ujung (μ)	Tarik	61.665	68.000
		Tekan	-45.601	-50.000
	γ Panel Tengah (μ)	Tarik	4.177	5.200
		Tekan	-5.913	-11.200
ϵ pelat sayap (μ)	Tarik	20.381	24.000	
	Tekan	-16.366	-17.000	
Wing Plate	Gaya (kN)	Tarik	251,20	260,51
		Tekan	-279,76	-297,42
	Perpindahan (mm)	Tarik	19,80	23,10
		Tekan	-19,80	-23,10
	γ Panel Ujung (μ)	Tarik	62.212	66.000
		Tekan	-7.962	-72.000
	γ Panel Tengah (μ)	Tarik	3.816	72.000
		Tekan	-2.018	-84.000
ϵ pelat sayap (μ)	Tarik	25.899	29.000	
	Tekan	-10.984	-12.000	
Hibrid	Gaya (kN)	Tarik	256,05	278,23
		Tekan	-249,90	-271,82
	Perpindahan (mm)	Tarik	19,80	26,40
		Tekan	-19,80	-26,40
	γ Panel Ujung (μ)	Tarik	21705	52000
		Tekan	-6062	-34000
	γ Panel Tengah (μ)	Tarik	8940	18000
		Tekan	-2125	-35000
ϵ pelat sayap (μ)	Tarik	27686	43000	
	Tekan	-14654	-30000	



(a)

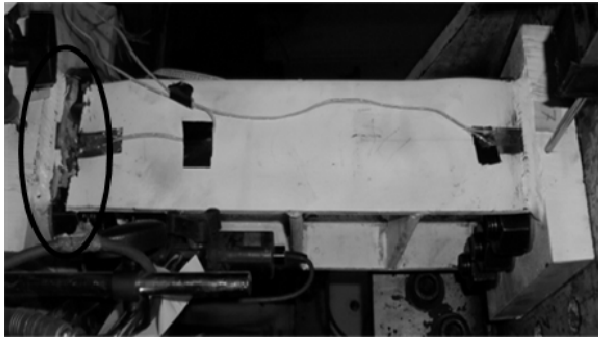


(b)

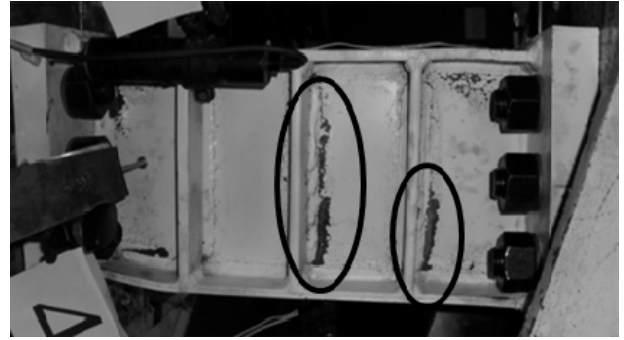


(c)

Gambar 10. Perbandingan kurva histeresis: (a) link built up dan link wing plate; (b) link built up dan link hibrid; (c) envelope kurva histeretik pada $d = 6.5 \delta_y = 21,45$ mm dan rotasi link= $0,046$ rad

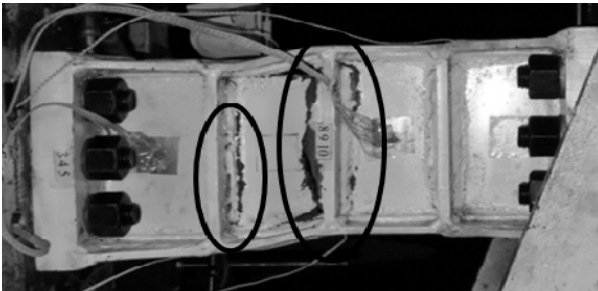


(a)



(b)

Gambar 11. Kegagalan link built-up (a) Fraktur pelat sayap (b) Fraktur bagian tengah elemen link



(a)



(b)

Gambar 12. Kegagalan link wing plate (a) Fraktur panel tengah elemen link (b) Tidak terdapat fraktur pada pelat sayap

Mekanisme kegagalan pada link hibrid diawali dengan fraktur pada pelat badan link yang kemudian diikuti oleh fraktur pada pelat sayap link bagian ujung (**Gambar 13**). Hal ini menunjukkan link berperilaku seperti link geser yang direncanakan, yaitu secara efektif melakukan mekanisme leleh geser pada seluruh pelat badan sampai tercapai fraktur geser pada pelat badan.

Peningkatan mutu pada pelat sayap berhasil mencegah terjadinya kegagalan pada pelat sayap, dan sekaligus memungkinkan terjadinya leleh yang berkelanjutan pada seluruh pelat badan link secara lebih merata, yaitu pada pelat badan panel ujung dan tengah.

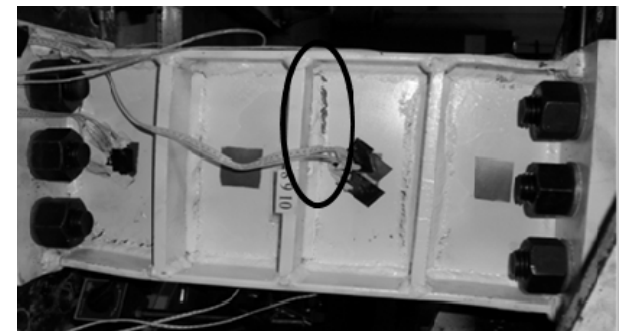
3.3 Energi disipasi

Besarnya energi disipasi melalui mekanisme lelehnya link diperhitungkan pada siklus pembebanan paska leleh, dimana sebuah siklus pembebanan terdiri dari satu siklus primer dan dua siklus stabilisasi. Pelaporan besarnya perpindahan dan beban pada **Tabel 4**, **5**, dan **6** hanya ditulis terhadap siklus primer,

Tabel 4 memperlihatkan besarnya gaya geser pada ketiga benda uji link akibat perpindahan maksimum pada setiap siklus pembebanan yang dicatat untuk kondisi aktuator tarik dan tekan.

Berdasarkan kurva histeresis beban-perpindahan yang dihasilkan, dihitung luasan yang dibentuk pada setiap

siklus, dan kemudian untuk masing-masing benda uji dihitung besarnya energi disipasi pada tiap siklus pembebanan, Ehi, dan besarnya energi disipasi kumulatif pada tiap siklus pembebanan, Ehki, yang hasilnya dapat dilihat pada **Tabel 5** dan **6**.



(a)



(b)

Gambar 13. Kegagalan link hibrid (a) Fraktur pelat sayap (b) Fraktur pada bagian tengah elemen link

Tabel 4. Gaya tarik dan tekan per siklus

Siklus	Perpindahan (δy)	Rotasi	Gaya Aktuator (kN)					
			Link Built Up		Link Wing Plate		Link Hibrid	
			Tarik (V_1)	Tekan (V_1')	Tarik (V_2)	Tekan (V_2')	Tarik (V_3)	Tekan (V_3')
1	1,5	0,011	191,32	-206,88	212,24	-234,78	195,61	-199,98
2	2	0,014	198,41	-218,31	222,85	-243,59	207,52	-210,33
3	2,5	0,018	202,09	-223,46	228,08	-247,27	213,18	-213,84
4	3	0,021	207,29	-227,80	233,73	-252,55	218,24	-216,59
5	3,5	0,025	214,68	-233,23	241,48	-261,15	225,16	-221,40
6	4	0,028	222,40	-239,33	250,23	-271,54	234,06	-228,61
7	4,5	0,032	227,83	-244,59	257,45	-280,56	243,51	-236,98
8	5	0,035	229,31	-247,74	260,51	-285,19	251,43	-244,47
9	5,5	0,039	227,87	-248,94	258,02	-284,17	255,91	-249,13
10	6	0,042	228,96	-251,10	251,20	-279,76	256,05	-249,90
11	6,5	0,046	244,23	-261,07	245,21	-279,40	252,83	-247,49
12	7	0,049	-	-	250,49	-297,42	249,91	-245,16
13	7,5	0,053	-	-	-	-	254,50	-249,61
14	8	0,056	-	-	-	-	278,23	-271,82

Tabel 5. Energi disipasi per siklus

Siklus Uji	Perpindahan (δy)	Rotasi	Energi Disipasi			Rasio	
			Eh1	Eh2	Eh3	Eh2/Eh1	Eh3/Eh1
			(kN-m)	(kN-m)	(kN-m)		
1	1,5	0,011	1,9	3,5	2,1	1,84	1,11
2	2	0,014	4,1	6,4	4,5	1,56	1,10
3	2,5	0,018	6,7	9,7	7	1,45	1,04
4	3	0,021	9,6	13	9,9	1,35	1,03
5	3,5	0,025	12,6	16,8	13	1,33	1,03
6	4	0,028	15,8	20,8	16,2	1,32	1,03
7	4,5	0,032	19,2	25	19,6	1,30	1,02
8	5	0,035	22,4	29,4	23,4	1,31	1,04
9	5,5	0,039	26,3	33,6	27	1,28	1,03
10	6	0,042	30,1	38,1	31,1	1,27	1,03
11	6,5	0,046	-	41,7	35,2	-	-
12	7	0,049	-	-	39,3	-	-
13	7,5	0,053	-	-	43,4	-	-

Tabel 6. Energi disipasi kumulatif

Siklus Uji	Perpindahan (δy)	Rotasi	Energi Disipasi Kumulatif			Rasio	
			Ehk1	Ehk2	Ehk3	Ehk2/Ehk1	Ehk3/Ehk1
			(kN-m)	(kN-m)	(kN-m)		
1	1,5	0,011	1,9	3,5	2,1	1,84	1,11
2	2	0,014	6	9,9	6,6	1,65	1,10
3	2,5	0,018	12,7	19,6	13,6	1,54	1,07
4	3	0,021	22,3	32,6	23,5	1,46	1,05
5	3,5	0,025	34,9	49,4	36,5	1,42	1,05
6	4	0,028	50,7	70,2	52,7	1,38	1,04
7	4,5	0,032	69,9	95,2	72,3	1,36	1,03
8	5	0,035	92,3	124,6	95,7	1,35	1,04
9	5,5	0,039	118,6	158,2	122,7	1,33	1,03
10	6	0,042	148,7	196,3	153,8	1,32	1,03
11	6,5	0,046	-	238	189	-	-
12	7	0,049	-	-	228,3	-	-
13	7,5	0,053	-	-	271,7	-	-

Rasio perbandingan antara besarnya energi disipasi per-siklus pada *link wing-plate* dan *link built-up*, Eh2 / Eh1 dan antara besarnya energi disipasi per-siklus pada *link hibrid* dan *link built-up*, Eh3 / Eh1, dapat dilihat pada **Tabel 5** sedangkan untuk rasio perbandingan untuk besarnya energi disipasi kumulatif pada tiap siklus pembebanan, Ehk2 / Ehk1 dan Ehk3 / Ehk1 ditunjukkan pada **Tabel 6**. Nilai rasio lebih dari 1,0 menunjukkan disipasi energi akibat lelehnya *link wing-plate* dan *link hibrid* lebih besar daripada *link-built-up*.

Selanjutnya dapat diamati bahwa besarnya energi disipasi per-siklus pada *link wing-plate* selalu lebih besar daripada kedua *link* lainnya (**Tabel 5**). Namun secara kumulatif, **Tabel 6** menunjukkan bahwa *link hibrid* mampu mendisipasi energi lebih besar daripada kedua *link* lainnya.

3.4 Peningkatan kinerja

Berdasarkan pengamatan visual, kurva histeretik, dan pembacaan strain-gauges pada ketiga benda uji *link geser*, dapat ditunjukkan peningkatan kinerja pada *link geser* dengan *wing plate* dan *link geser* dengan peningkatan mutu pelat sayap, dibandingkan terhadap kinerja *link built-up* yang mengalami kegagalan fraktur pada pelat sayap ujung, sebagai berikut:

a. *Link wing plate*

Peningkatan kinerja terjadi pada kekuatan, daktilitas, dan disipasi energi. **Tabel 4** menunjukkan besarnya gaya maksimum yang dapat ditahan meningkat menjadi sebesar 260 kN (tarik) dan 297 kN (tekan) atau 6,5% dan 13,8% lebih baik dari *link built-up*. Jumlah siklus pembebanan meningkat hingga rotasi *link* maksimum mencapai 0.049 rad dan daktilitas mencapai 7,0 atau meningkat 6,5%.

Jumlah energi disipasi per-siklus meningkat cukup signifikan (**Tabel 5**), dari peningkatan sebesar 84% (siklus 1) dan menurun hingga rata-rata sebesar 27% (siklus 10), sedangkan jumlah energi disipasi kumulatif total menjadi 238 kNm (**Tabel 6**) atau meningkat 60,8%.

Peningkatan ini disebabkan karena pelebaran pelat sayap bagian ujung *link* telah menurunkan besarnya tegangan tarik dan menunda kelelahan pada pelat sayap ujung dan meningkatkan gaya aktuator (inelastik) akibat kelelahan pelat badan. Hal ini menyebabkan energi disipasi pada setiap siklus (inelastik) meningkat yang ditunjukkan dengan luasan kurva pada setiap siklus (inelastik) yang meningkat karena siklus penyerapan energi dapat terjadi lebih efektif di seluruh pelat badan (panel ujung dan tengah).

Selain itu, penundaan kelelahan dan tidak terjadinya kegagalan (fraktur) pada pelat sayap ujung menyebabkan jumlah siklus pembebanan inelastik meningkat menjadi 11 siklus atau pada nilai daktilitas 6,5, dan menghasilkan peningkatan jumlah energi disipasi kumulatif total yang cukup signifikan.

b. *Link hibrid*

Hasil uji pada *link hibrid* menunjukkan peningkatan kekuatan, daktilitas, dan disipasi energi dibandingkan dengan *link built-up*. Besar gaya geser maksimum mencapai 278 kN (tarik) dan 271 kN (tekan) atau 13,9% dan 3,8% lebih baik daripada *link built up* (**Tabel 4**). Jumlah siklus pembebanan meningkat hingga rotasi maksimum mencapai 0,053 rad dan daktilitas mencapai 7,5 atau meningkat 25%.

Tabel 5 menunjukkan peningkatan jumlah energi disipasi per-siklus terjadi lebih rendah daripada *link wing-plate* yaitu dari peningkatan sebesar 11% (siklus 1) dan menurun hingga rata-rata sebesar 3% (siklus 10), sedangkan jumlah energi disipasi kumulatif total menjadi 271 kNm atau meningkat 83,1% dibandingkan *link built-up* (**Tabel 6**).

Peningkatan kinerja ini disebabkan karena peningkatan mutu dan harga tegangan leleh pelat sayap pada *link hibrid* telah meningkatkan kurva histeretik pada nilai gaya aktuator (inelastik) yang lebih tinggi pada setiap siklus pembebanan (inelastik). Selain itu, peningkatan nilai tegangan leleh dan tegangan tarik pada pelat sayap berhasil menunda kegagalan awal (fraktur) pada pelat sayap bagian ujung, dan memungkinkan penyebaran leleh pada seluruh pelat badan hingga memperpanjang jumlah siklus pembebanan hingga mencapai 13 siklus atau pada nilai daktilitas 7,5, yang pada akhirnya meningkatkan jumlah disipasi energi pada kurva histeretik yang lebih luas.

4. Kesimpulan

1. Kajian eksperimental menunjukkan bahwa kinerja *link geser* pada Sistem Rangka Baja Bresing Eksentrik berupa kekuatan, daktilitas dan disipasi energi, dapat ditingkatkan melalui penggunaan *link wing plate* dan *link hibrid*, yaitu dengan mengupayakan penyebaran leleh dan disipasi energi yang lebih merata terutama ke seluruh pelat badan sepanjang *link*.
2. Penambahan *wing plate* pada kedua ujung *link geser* berhasil mengurangi besarnya tegangan yang bekerja akibat momen lentur maksimum yang bekerja pada pelat sayap bagian ujung *link*, mencegah terjadinya kegagalan awal pada pelat sayap, dan sekaligus memungkinkan terjadinya pelelahan dan penyerapan energi lebih merata pada seluruh pelat badan *link*.

3. Penggunaan link hibrid dengan pelat sayap bermutu lebih tinggi daripada pelat badan link, dapat mencegah terjadinya leleh awal dan kegagalan awal akibat fraktur pada pelat sayap, dan sekaligus mendorong pelelehan yang lebih maksimal dan merata pada pelat badan link.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terimakasih atas dukungan dana bagi pelaksanaan penelitian ini melalui Riset KK Institut Teknologi Bandung.

Daftar Pustaka

- AISC, 2010, *Seismic Provision for Structural Steel Building*. Chicago: American Institute of Steel Construction.
- Mirza, A., 2006, *Kinerja Disposable Link pada Struktur Rangka Berpengaku Eksentrik yang Memikul Beban Siklik*, Tesis Magister Teknik Sipil Institut Teknologi Bandung.
- Moestopo, M., Kusumastuti, D., Novan, A., 2008, *Improved Performance of Bolt-Connected Link Due to Cyclic Load*, Jakarta: International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation.
- Moestopo, M., Mirza, A., 2006, *Kinerja Sambungan Baut pada Link Struktur Rangka Baja Eksentrik*, Seminar & Pameran HAKI.
- Novan, A., 2008, *Kinerja Sambungan Baut Tipe Flush dalam Memikul Beban Siklik*, Tesis Magister Teknik Sipil Institut Teknologi Bandung.
- Panjaitan, A.R., 2010, *Peningkatan Kinerja Link Geser dalam Memikul Beban Siklik*, Tesis Magister Teknik Sipil Institut Teknologi Bandung.
- Ramadan, T., Ghobarah, A., 1994, Behaviour of Bolted Link-Column Joints in Eccentrically Braced Frame, *Canadian Journal of Civil Engineering*, pp.745-754.
- Stratan, A., Dubina, D., 2004, Bolted Link for Eccentrically Braced Steel Frames, *Connections in Steel Structures V*, pp.223-332
- SNI-03-1726-2002, Tata Cara Perencanaan Bangunan Tahan Gempa, Badan Standar Nasional
- SNI 03-1729-2002, Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Bangunan Gedung, Badan Standar Nasional.