

Studi Numerik Terhadap Kinerja Serta Perilaku Elemen *Web-Bolted Replaceable Link* Pada *Eccentrically Braced Frames*

Aulia Indira Kumalasari^{1,*}, Budi Suswanto¹, Hidajat Sugihardjo¹

Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya¹

Koresponden*, Email: auliaindira09@gmail.com

Info Artikel		Abstract
Diajukan	17 Desember 2019	<p><i>Eccentrically Braced Frame (EBF) restricts the inelastic behavior only occur at the link beam while the other element remains elastic after subjected into lateral load. Occasionally, over-designed link happens because it is designed integrated with the beam floor that has to resist substantial forces. Five web-bolted links were modelled numerically. The link specimens were assembled back-to-back from two C-channel section. Both ends of the C-channel were clamped on the floor beam and connected with 1 inch A490 bolts. Cyclic load was given to the specimens and its behavior were observed. From the analysis can be observe that additional web stiffener plate provided could resist larger shear force. Pinching effect could be observed from the hysteretic curve due to ovalize that happened at the bolt hole as a consequence of cyclic load.</i></p>
Diperbaiki	30 Januari 2020	
Disetujui	30 Januari 2020	
<p>Keywords: <i>web-bolted link, replaceable link, diagonal stiffeners, hysteretic curve, pinching effect.</i></p>		<p>Abstrak Rangka berpegaku eksentrik mensyaratkan untuk membatasi perilaku inelastis hanya terjadi pada balok <i>link</i> sedangkan elemen lainnya tetap dalam kondisi elastis. <i>Link</i> yang didesain menyatu dengan balok induk menjadikan <i>link</i> mengalami <i>over-designed</i> karena harus menahan beban yang besar pula seperti balok induk. Lima spesimen <i>link</i> yang disusun dari dua buah profil C yang disusun secara bersinggungan dan kedua ujungnya dipasang mengapit balok induk dimodelkan secara numerik yang kemudian diberi beban siklik. Dari hasil analisis didapatkan bahwa penambahan pengaku pada sambungan <i>web</i> menunjukkan bahwa spesimen mampu menahan gaya geser yang lebih besar. Efek <i>pinching</i> ditemukan pada kurva histerisis yang disebabkan oleh efek dari sambungan baut di kedua ujung balok <i>link</i> akibat dari pemberian beban siklik.</p>
<p>Kata kunci: <i>link</i> dengan sambungan baut, <i>replaceable link, diagonal stiffeners</i>, kurva histerisis, efek <i>pinching</i></p>		

1. Pendahuluan

Eccentrically Braced Frames (EBF) merupakan suatu sistem rangka yang dapat menginduksi gaya aksial melalui elemen pengaku (*bracing*) yang kemudian disalurkan kembali ke *bracing* lainnya ataupun kolom melalui suatu mekanisme geser maupun tekuk yang terjadi pada segmen balok yang disebut *link*[1],[2]. Lelehnya elemen *link* sangat mempengaruhi cara kerja sistem EBF, dimana elemen tersebut dirancang berfungsi seperti *fuse* yang diharapkan mampu menahan perubahan inelastik yang besar pada saat elemen struktur lainnya tetap dalam kondisi elastis[3],[4],[5]. Sistem pada EBF memiliki kekakuan serta daktilitas yang tinggi mengingat sistem tersebut merupakan penggabungan antara sistem *Moment Resisting Frames* (MRF) dan *Concentrically Braced Frames* (CBF)[4],[6],[7].

Penggunaan *replaceable link* mulai dipertimbangkan dan dikembangkan mengingat *replaceable link* memungkinkan untuk dilakukan kontrol secara independen terhadap kekuatan serta daktilitas pada sistem EBF [8],[9]. Pada saat melakukan desain elemen *replaceable link*, tinggi elemen

link ditetapkan kurang dari tinggi balok induk sehingga elemen tersebut dapat terpisah dari plat lantai untuk memudahkan dilakukannya perbaikan [10],[11].

Penelitian telah dilakukan terhadap *shear replaceable link* dengan *web bolted connection* yang tersusun dari dua buah balok profil *C-channel* yang disusun secara bersinggungan sehingga *link* memiliki dua buah bidang geser [8],[10]. Selain itu, *link* dengan dua profil *C-channel* didefinisikan memiliki panjang bidang geser *web-bolted link* dengan jarak antara baut terdalam di kedua sisi pada elemen *link* sehingga nilai V_p untuk *replaceable link* yang tersusun dari dua profil C yaitu:

$$V_p = 2 \cdot 0.55 \cdot w d f_y \quad (1)$$

$$e = 1.6 M_p / V_p \quad (2)$$

dimana:

M_p = Kapasitas momen plastis

V_p = Kapasitas geser plastis

w = lebar bidang geser pada *link*

$$d = (h - 2t_f) \quad (3)$$

F_y = tinggi bidang geser pada link
 = kuat leleh baja

Hasil dari eksperimen Mansour dkk[10] menunjukkan bahwa *web-bolted link* menunjukkan *link* memiliki rotasi yang besar ketika diberi beban siklik akibat sambungan baut pada kedua ujung balok *link*. Efek *pinching* dapat diamati pada kurva histerisis spesimen karena *ovalized* yang terjadi pada lubang baut yang diakibatkan oleh pemberian beban siklik[10].

Sedangkan menurut Mander[12] dalam Rofiq dkk[13], tegangan-regangan baja dapat didekati dengan persamaan:

- Elastic loading ($\varepsilon_{st} \leq \varepsilon_y$)

$$f_s = E_s \varepsilon_s \quad (4)$$

- Yield Plateu ($\varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh}$)

$$f_s = f_y \quad (5)$$

- Stain Hardened Curve ($\varepsilon_{sh} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su}$)

$$f_s = f_{su} + (f_y - f_{su}) \left[\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}} \right]^P \quad (6)$$

$$P = E_{sh} \left(\frac{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}}{f_y - f_u} \right) \quad (7)$$

Dimana:

f_u = Kuat tarik ultimate material baja

f_s = Kuat tarik leleh material baja

ε_s = Regangan tarik baja

ε_y = Regangan tarik baja pada saat kondisi leleh

ε_{sh} = Regangan tarik baja pada saat kondisi *strain hardening*

P = Rasio *strain hardening modulus* ke *secant modulus*.

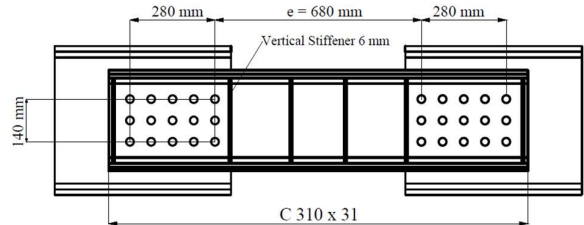
Pengaku pada *link* memiliki keterkaitan dengan gaya geser serta rotasi yang terjadi pada link. *Link* konservatif dengan penambahan pengaku *diagonal* mampu menahan gaya lateral yang lebih besar apabila dibandingkan dengan *link* tanpa pengaku *diagonal*, serta memiliki kemampuan untuk mendisipasi energi dengan baik[14]. Namun pengaplikasian pengaku *diagonal* pada elemen *replaceable link* perlu dikaji lebih lanjut agar perilaku link tetap sesuai kaidahnya yaitu mencapai kondisi plastis setelah diberi beban lateral[4].

2. Metode

Pemodelan serta analisa secara numerik dilakukan untuk mengetahui perilaku elemen *replaceable link* apabila dikenai beban siklik. Lima *replaceable link* dimodelkan dengan menggunakan program Abaqus. Spesimen mengadopsi hasil eksperimen dari Mansour dkk[10] dimana spesimen disusun dari dua buah balok C-Channel dan direncanakan memiliki panjang (e) 680 mm yang dihitung dari jarak baut bagian dalam pertama di kedua sisi sambungan. Kedua balok tersebut dipasang mengapit balok induk secara bersinggungan dan kedua ujungnya diberikan sambungan tipe tumpu. Baut yang digunakan merupakan baut A490 dengan ukuran 24.5 mm. Dapat dilihat bahwa pada bagian *flange* diberikan plat pengaku setebal 10 mm untuk memastikan agar pelelehan terjadi pada bidang *web*.

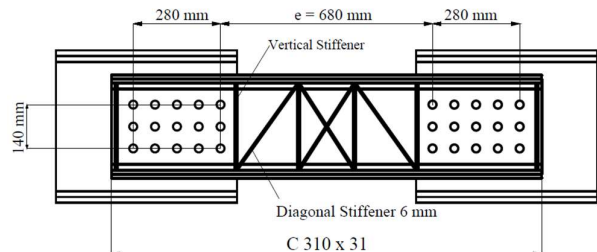
Pemodelan numerik terhadap spesimen WBRL1, WBRL2, WBRL3, dan WBRL4 dilakukan. dengan program Abaqus. Ilustrasi spesimen dapat dilihat pada **Gambar 1** sampai **Gambar 4**. Pada **Gambar 1**, Spesimen WBRL 1 didesain menggunakan material BJ37 yang memiliki nilai $f_y = 240$ MPa dan $f_u = 370$ MPa. Spesimen WBRL1 kemudian akan dijadikan model dasar untuk model pengembangan spesimen WBRL2, WBRL3, dan WBRL4.

Sedangkan pada **Gambar 2** yang merupakan spesimen WBRL2, *diagonal stiffeners* diberikan pada spesimen uji untuk mengetahui respon *link* dalam menahan gaya geser. Untuk spesimen WBRL3 seperti pada **Gambar 3**, plat setebal 6 mm diberikan pada bagian sambungan baut untuk menghindari terjadinya kegagalan tumpu pada bagian tersebut. Sedangkan spesimen WBRL4 yang diilustrasikan pada **Gambar 4** mengkombinasikan penambahan *diagonal stiffeners* dengan *web connection plate*.



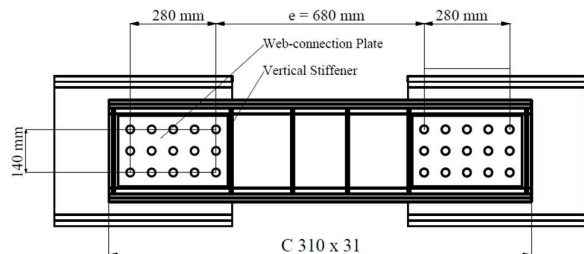
Gambar 1. Spesimen WBRL1

Sumber: Hasil Analisis



Gambar 2. Spesimen WBRL2

Sumber: Hasil Analisis

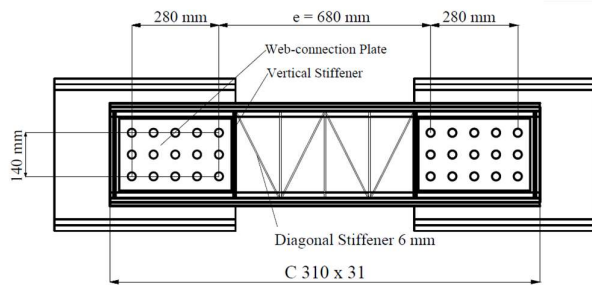


Gambar 3. Spesimen WBRL3

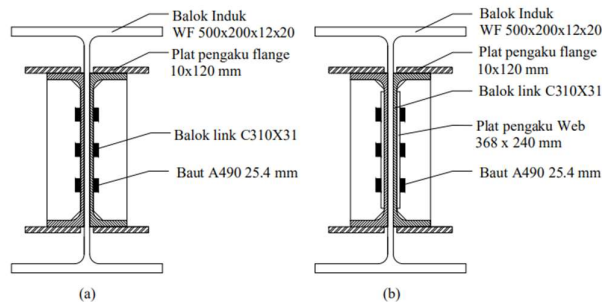
Sumber: Hasil Analisis

Potongan melintang dari spesimen uji akan diilustrasikan seperti pada **Gambar 5**. Dari **Gambar 5** dapat dilihat model

penyusunan spesimen yang kemudian akan dilakukan pengujian numerik.



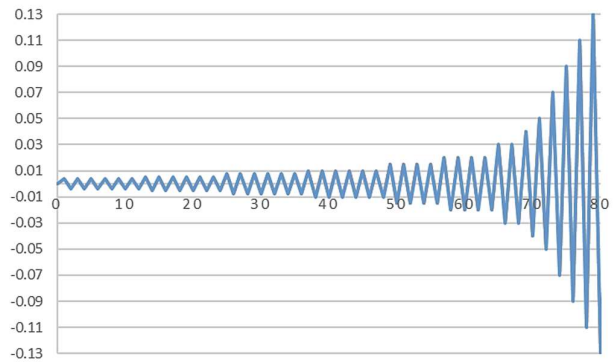
Gambar 4. Spesimen WBRL4
Sumber: Hasil Analisis



Gambar 5. Potongan melintang spesimen (a) WBRL1 dan WBRL2; (b) WBRL3 dan WBRL4
Sumber: Hasil Analisis

Pemodelan secara numerik dilakukan dengan bantuan program Abaqus. Spesimen dimodelkan dengan menggunakan tipe elemen C3D8R dimana elemen tersebut merupakan jenis elemen *solid (brick)* yang merupakan *default* elemen dari program Abaqus. Elemen tersebut memiliki delapan nodal dan pada masing-masing nodal memiliki tiga *degree of freedom (DOF)* yaitu perpindahan pada arah $x (u_1)$, arah $y (u_2)$, dan arah $z (u_3)$. Tiga jenis material yang berbeda digunakan pada pemodelan spesimen.

Loading protocol yang tercantum pada AISC 2005[16] digunakan untuk mendefinisikan beban yang berupa *displacement* pada spesimen yang dimodelkan. Pada pemodelan, perpindahan pada rotasi 0.0075 rad diberikan pada saat siklus pembebanan pertama untuk mempersingkat proses pemberian beban siklik pada Abaqus. Pemberian beban tersebut kemudian diteruskan dengan besaran yang sesuai dengan ketentuan hingga *link* mengalami kegagalan. Namun pada pemodelan kali ini pemberian beban yang dilakukan secara bertahap dibatasi hanya sampai siklus ke-52 atau sama dengan perpindahan sebesar 72 mm untuk mempersingkat waktu dalam melakukan analisa. *Loading protocol* yang digunakan pada pemodelan diilustrasikan pada **Gambar 6**.



Gambar 6. *Loading protocol* [16]
Sumber: AISC 2005 Seismic Provision

Material yang digunakan dalam menyusun *spesimen replaceable link* terdiri dari tiga jenis. Material yang digunakan tersebut adalah BJ55 digunakan untuk memodelkan balok induk, BJ37 digunakan untuk memodelkan balok *link*, serta baut tipe A490. Mutu dari material disesuaikan dengan SNI 03-1729-2002 [15]. Material tersebut dipilih agar hasil dari pemodelan dapat sesuai dengan ekspektasi yang diharapkan yaitu elemen *link* mampu mencapai kondisi inelastis disaat elemen lainnya, dalam hal ini balok induk dan baut, tetap dalam kondisi plastis. Mutu dari ketiga material tersebut akan ditabelkan dalam **Tabel 1**.

Sedangkan spesifikasi masing-masing material baja yang digunakan pada pemodelan mengacu pada SNI 03-1729-2002 [15] dimana pada pemodelan numerik jenis material yang digunakan adalah BJ37 serta BJ55. Spesifikasi dari material merupakan parameter yang sangat penting dalam pemodelan abaqus karena parameter tersebut sangat mempengaruhi hasil akhir dari pemodelan. Spesifikasi material baja tersebut seperti yang tercantum pada **Tabel 3**.

Sedangkan untuk baut yang digunakan dalam pemodelan merupakan baut tipe A490 dengan diameter 1 in atau 25.4 mm. Spesifikasi material baut tersebut dituliskan seperti yang tercantum pada **Tabel 4**.

Pada pemodelan, model interkasi antar elemen jenis *surface to surface interaction* tipe *hard contact* dengan koefisien geser 0.42 diberikan pada kontak permukaan antara balok induk dengan *link*, *bolt shank* dengan *hole shank*, dan permukaan kepala baut bagian dalam dengan permukaan *link* dimana gaya geser diijinkan untuk terjadi pada bagian-bagian tersebut. Koefisien tersebut dipilih berdasarkan Gooch [18] dimana koefisien 0.42 digunakan untuk kontak geser tipe *sliding* dengan tipe material *hard steel to hard steel* pada permukaan material yang kering (*dry*). Sedangkan interaksi tipe *tie constraint* diberikan pada permukaan kontak antara *stiffeners* dengan *link* dan antara balok *link* dengan *web-connection plate*.

Tabel 1. Material Penyusun Spesimen Link

No	Nama Spesimen	Jenis Elemen	Material	Dimensi
1.	WBRL1	Balok Induk	BJ 55	WF 500x200x12x20
		Balok <i>Link</i>	BJ 37	C310x31
		<i>Stiffeners Web</i>	BJ 37	279.6x66.8x6 mm
		Baut	A490	25.4 mm
		Plat Pengaku <i>Flanges</i>	BJ 37	120 x 10 mm
2.	WBRL2	Balok Induk	BJ 55	WF 500x200x12x20
		Balok <i>Link</i>	BJ 37	C310x31
		<i>Stiffeners Web</i>	BJ 37	279.6x66.8x6 mm
		Diagonal <i>Stiffeners</i>	BJ 37	66.8 x 4 mm
		Baut	A490	25.4 mm
3.	WBRL3	Plat Pengaku <i>Flanges</i>	BJ 37	120 x 10 mm
		Balok Induk	BJ 55	WF 500x200x12x20
		Balok <i>Link</i>	BJ 37	C310x31
		<i>Stiffeners Web</i>	BJ 37	279.6x66.8x6 mm
		<i>Web-connection plate</i>	BJ 37	384 x 230 x 6 mm
4.	WBRL4	Baut	A490	25.4 mm
		Plat Pengaku <i>Flanges</i>	BJ 37	120 x 10 mm
		Balok Induk	BJ 55	WF 500x200x12x20
		Balok <i>Link</i>	BJ 37	C310x31
		<i>Stiffeners Web</i>	BJ 37	279.6x66.8x6 mm
		Diagonal <i>Stiffeners</i>	BJ 37	66.8 x 4 mm
		<i>Web-connection plate</i>	BJ 37	384 x 230 x 6 mm
		Baut	A490	25.4 mm
		Plat Pengaku <i>Flanges</i>	BJ 37	120 x 10 mm

Sumber: Hasil Analisis

Tabel 2. Spesifikasi Material Baja Pemodelan Abaqus[19]

Jenis Baja	Tegangan Putus Minimum (f_u)	Tegangan leleh minimum (f_y)	Peregangan Minimum (%)
BJ37	370	240	20
BJ55	550	410	13
Modulus Young	: 200000 MPa		
Modulus Geser	: 80000 MPa		
Poisson Ratio	: 0.3		
Berat Jenis	: 7850 kg/m ³		

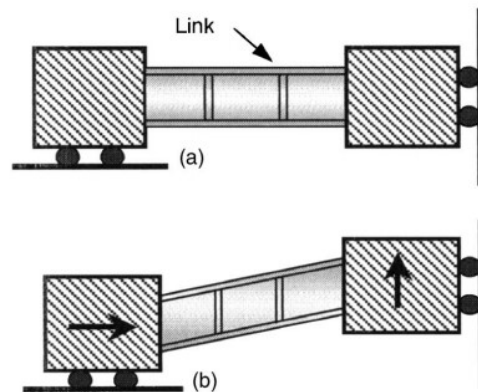
Sumber: SNI 03-1729-2002 Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung

Tabel 3. Spesifikasi Material Baut Model Abaqus[20]

Tipe Baut	Diam eter	Beban Leleh Metode Pengukuran Panjang	Beban Leleh Metode Kekuatan Leleh	Kuat Tarik Min
	in (mm)	ksi (Mpa)	ksi (Mpa)	ksi (Mpa)
A490	1/2 - 1 1/2 (12.7 - 38.1)	120 (825)	130 (895)	150 (1035)

Sumber: Salmon, C. Johnson, J(1997)

Boundary condition yang diberikan pada *link* disesuaikan dengan penelitian yang dilakukan oleh Richards dan Uang[15] seperti yang tercantum pada **Gambar 7** dimana pada penelitian sebelumnya, pembatasan rotasi diberikan di kedua ujung spesimen. Beban berupa perpindahan arah Y diberikan pada nodal di sisi kanan, sedangkan nodal di sisi kiri dibatasi hanya dapat bergerak secara horizontal. Model tersebut akan menghasilkan gaya geser yang sama di sepanjang *link*.



Gambar 7. Boundary condition pengujian numerik[11]
Sumber: Tan dkk, (2011).

Parameter yang digunakan pada pemodelan Abaqus terhadap spesimen replaceable link seperti yang tercantum pada Tabel 2.

Tabel 4. Parameter Pemodelan Abaqus

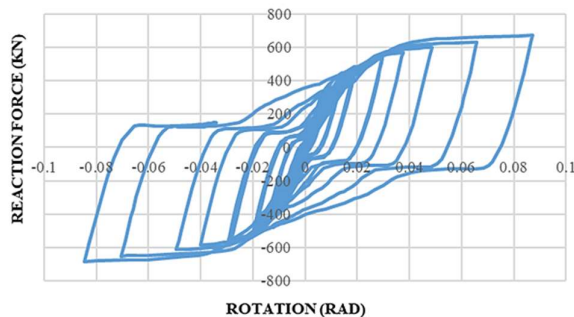
Geometri Pemodelan Abaqus	
Elemen	: Brick
Modeling Type	: 3D deformable
Tipe Elemen	: C3D8R
Material Model	: Bilinear elasto-plastis
Mesh Size	: 40 mm
Pembebanan:	
Pembebanan	: Displacement control berdasarkan AISC 2005
Jumlah Siklus Pembebanan	: 52 siklus
Boundary Condition Type	: Displacement and Rotation
Interaction	
Jenis interaksi	: Surface to Surface
Friction Formulation	: Pinalty
Koefisien Geser	: 0.42 (Hard contact)
Constraint	: Tie Constraint

Sumber: Hasil Analisis

3. Hasil dan Pembahasan

A. Spesimen WBRL1

Kurva histeresis didapatkan dari menggabungkan hasil reaction force (RF) dan displacement yang terletak di ujung balok link pada spesimen WBRL1 menunjukkan hasil seperti pada Gambar 8. Hasil dari kurva histeresis menunjukkan bahwa spesimen tersebut mampu menahan geser maksimum sebesar 671.371 kN pada saat link mengalami rotasi sebesar 0.093 rad. Hasil tersebut didapatkan pada saat pembebanan maksimum yaitu ketika displacement yang diberikan sebesar 72 mm pada siklus ke-52.



Gambar 8. Kurva histeresis spesimen WBRL1

Sumber: Hasil Analisis

Spesimen WBRL1 mengalami pelepasan pertama yaitu pada saat spesimen mengalami siklus pembebanan ke-12. Pada siklus tersebut, spesimen mengalami perpindahan sebesar 5.04 mm. Pelepasan terjadi pada saat link menahan gaya geser (shear force) sebesar 355.21 kN. Gaya tersebut didisipasi oleh link pada saat link mengalami rotasi sebesar

0.0078 rad. Pelepasan tersebut dapat diamati pada daerah sambungan dimana hal tersebut terjadi karena pada daerah tersebut terdapat kelemahan di area web berupa lubang-lubang baut. Lubang baut tersebut mengurangi luasan dari bidang geser sehingga mengalami tegangan yang besar ketika diberikan beban displacement.

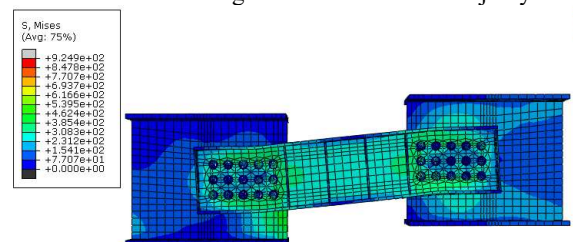
Spesimen WBRL1 mengalami kondisi ultimate pertama pada saat spesimen mengalami siklus pembebanan ke-42 yaitu dimana spesimen mengalami displacement sebesar 21.21 mm. dapat dilihat dari kurva hysteresis pada Gambar 8 bahwa kondisi ultimate link terjadi pada saat rotasi link terjadi sebesar 0.031 rad dan link mampu menahan gaya geser sebesar 555.36 kN. Pada siklus tersebut, bagian sambungan pada spesimen WBRL1 telah mencapai kondisi tegangan ultimatenya yaitu sebesar 370 MPa. Sedangkan pada siklus ke-52, bidang web diantara dua baut telah mengalami pelepasan, yaitu dimana tegangan von mises telah mencapai diatas 240 MPa dan pada siklus tersebut pula pembebanan dihentikan. Kondisi spesimen ketika mencapai tegangan leleh serta tegangan ultimate awal dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Kondisi Leleh Pertama dan Ultimate Pertama pada WBRL1

	Siklus Ke-	Displacement (mm)	Rotation (rad)	Shear Force (kN)
Leleh Awal	12	5.04	0.0078	355.21
Ultimate Awal	42	21.21	0.031	555.36
Gaya Maks	52	70.89	0.093	671.371

Sumber: Hasil Analisis

Hasil dari pemodelan numerik WBRL1 terhadap tegangan yang terhadjadi dapat diamati pada Gambar 9. Pada bagian link, pelepasan terjadi secara merata pada bagian web pada saat siklus pembebanan terakhir. Pada bagian sambungan, web pada link sebagian besar telah melampaui f_u yaitu sebesar 370 MPa. Pada bagian tersebut juga dapat diamati bahwa beberapa lubang baut mengalami pelepasan hingga mengalami perubahan bentuk menjadi oval. Hal tersebut menyebabkan munculnya efek pinching pada kurva histeretik pemodelan. Spesimen ini kemudian akan dijadikan dasar untuk membandingkan model variasi selanjutnya.



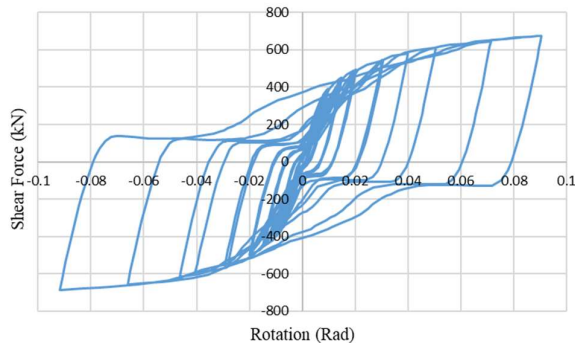
Gambar 9. Tegangan pada WBRL1 pada siklus terakhir

Sumber: Hasil Analisis

B. Spesimen WBRL2

Pemodelan pada spesimen WBRL2 menunjukkan kurva histeresis seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 10**. *Link* geser mampu menahan gaya geser maksimum sebesar 676.79 kN. Reaksi tersebut terjadi ketika *link* mengalami rotasi (γ) sebesar 0.096 rad. *Pinching effect* juga terjadi pada spesimen dikarenakan adanya *ovalized* pada bagian sambungan.

Spesimen WBRL2 mengalami kondisi leleh pertama pada saat spesimen mengalami siklus ke-15 dimana pada siklus tersebut spesimen mengalami displacement sebesar 5.8 mm. Pelelehan pertama ditandai dengan tercapainya kondisi tegangan 240 MPa pada bagian sambungan link sebelah kiri dan kemudian pesebaran tegangan terjadi merata pada bagian *web* hingga ke bagian sambungan sebelah kanan dimana beban berupa *displacement* diletakkan. Dimana karena pembebanan tersebut yang pada akhirnya menggiring spesimen untuk mencapai tegangan *ultimatenya*. WBRL2 mencapai tegangan *ultimatenya* pada saat mengalami *displacement* sebesar 16.71 mm pada siklus ke-41. Kondisi *ultimate* pertama terjadi pada daerah sambungan baut. Kemudian pembebanan dihentikan pada siklus ke-52 dan dari hasil didapatkan gaya geser maksimum yang dapat didisipasi oleh WBRL2 senilai 676.79 kN.



Gambar 10. Kurva histeresis spesimen WBRL2

Sumber: Hasil Analisis

Seperti yang dapat diamati pada **Gambar 10**, pelelehan pertama spesimen terjadi pada saat link berotasi sebesar 0.0083 dengan nilai shear force yang mampu didisipasi oleh link sebesar 369.07 kN. Sedangkan pada saat mencapai tegangan *ultimate* pertama, link mampu mendisipasi gaya geser sebesar 518 kN dengan rotasi yang dialami link sebesar 0.0243 rad. Kondisi spesimen WBRL2 ketika mencapai tegangan leleh serta tegangan *ultimate* pertama dapat dilihat pada **Tabel 6**.

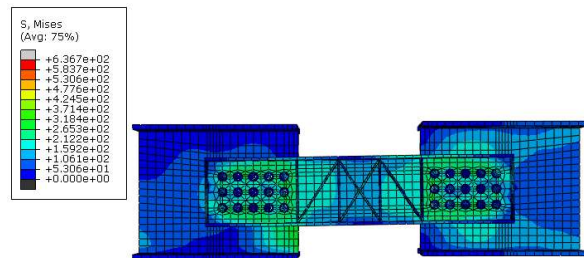
Pendistribusian tegangan yang terjadi pada spesimen WBRL2 dapat dilihat pada **Gambar 11**. Pada elemen link, tegangan yang terjadi bervariasi dengan nilai antara 106.1 MPa hingga 370 MPa. Dapat dilihat bahwa pada bagian sambungan, tegangan yang terjadi lebih besar apabila

dibandingkan dengan pada bagian bidang gesernya. Hal tersebut ditandai dengan gradasi warna hijau yang banyak didapatkan pada area sambungan. Sambungan menahan tegangan lebih besar karena adanya pengurangan luasan akibat lubang baut, yang menyebabkan luasan yang harusnya menerima tegangan menjadi lebih sempit, sehingga tegangan yang dipikul lebih besar. Dan juga dapat dilihat bahwa bracing tipe “x” mampu menahan tegangan lebih baik, bila dibandingkan dengan bracing dengan satu arah saja.

Tabel 6. Kondisi Leleh dan *Ultimate* pada WBRL2

	Siklus Ke-	Displacement (mm)	Rotation (rad)	Shear Force (kN)
Leleh Awal	12	5.80	0.008	369.07
<i>Ultimate</i> Awal	41	16.71	0.024	518.00
Gaya Maksimum	52	71.44	0.096	676.79

Sumber: Hasil Analisa



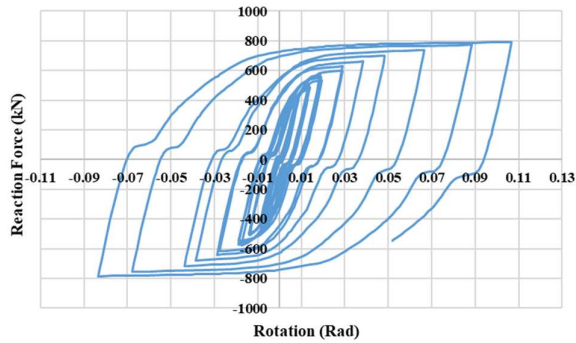
Gambar 11. Tegangan *von mises* pada WBRL2 pada siklus ke-52

Sumber: Hasil Analisis

C. Spesimen WBRL3

Hasil pemodelan numerik pada spesimen WBRL3 diilustrasikan pada **Gambar 12**. Penambahan pengaku pada bagian sambungan *web-bolted* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap hasil dari pemodelan terhadap bentuk serta besarnya *reaction force* spesimen uji. Kurva histeresis menunjukkan bahwa *link* mampu menahan gaya geser sebesar 773.69 kN pada saat rotasi yang dialami *link* (γ) terjadi sebesar 0.09 rad yaitu ketika pembebanan maksimum pada siklus ke-52. Dapat diamati adanya *pinching effect* pada kurva histeresis yang terjadi akibat lelehnya bagian sambungan *link*.

Pada spesimen WBRL3, pelelehan pertama terjadi pada saat siklus ke-18 atau saat link mengalami *displacement* sebesar 5.42 mm. Sedangkan kondisi *ultimate* pada link terjadi pada saat siklus ke-48 yaitu ketika link mengalami *displacement* sebesar 22.98. Setelah link mengalami siklus ke-52 pembebanan dihentikan dan didapatkan gaya geser yang mampu didisipasi oleh spesimen seperti yang tercantum pada **Gambar 12**.



Gambar 12. Kurva histeresis spesimen WBRL3

Sumber: Hasil Analisis

Pemberian plat pengaku pada sambungan menjadikan area sambungan menjadi lebih kaku. Plat pengaku mampu menahan perlelahan pada material. Hal tersebut dapat dilihat bahwa spesimen WBRL3 mencapai tegangan leleh awal pada siklus ke-18 yang apabila dibandingkan dengan WBRL1 dan WBRL2 yang masing-masing hanya mampu menahan tegangan leleh pertama terjadi pada saat siklus ke-12 dan ke-15.

Pada **Gambar 12**, dapat dilihat bahwa pelepasan pertama pada WBRL3 terjadi pada saat link mengalami rotasi sebesar 0.0083 rad yaitu ketika link mampu mendisipasi energi geser sebesar 410.73. Sedangkan pada saat link mengalami rotasi sebesar 0.036 rad, balok link mampu mencapai tegangan ultimate awalnya dan hal tersebut terjadi ketika link mampu mendisipasi shear force sebesar 658.31 kN. Kondisi spesimen WBRL3 ketika mencapai tegangan leleh serta tegangan ultimate pertama dapat dilihat pada **Tabel 7**.

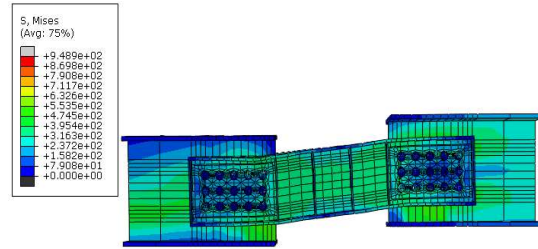
Tabel 7. Kondisi Leleh dan Ultimate pada WBRL3

	Siklus Ke-	Displacement (mm)	Rotation (rad)	Shear Force (kN)
Leleh Awal	18	5.42	0.008	410.73
Ultimate Awal	48	22.98	0.036	658.31
Gaya Maks	52	70.12	0.090	773.69

Sumber: Hasil Analisa

Sedangkan tegangan yang terjadi pada spesimen dapat dilihat pada **Gambar 13**. Bidang geser pada link seluruhnya mengalami pelepasan secara merata. Tegangan pada bidang geser bernilai antara 310 MPa hingga 372 MPa. Sedangkan pada bagian sambungan, penambahan pengaku web mampu menahan permukaan kontak antara bolt shank dengan balok link untuk tidak mengalami ovalized pada lubang baut

sehingga terjadinya kegagalan pada bagian sambungan dapat diminimalisir.



Gambar 13. Tegangan pada WBRL3 pada siklus terakhir

Sumber: Hasil Analisis

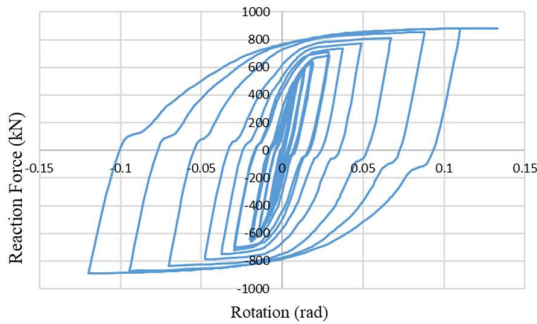
Plat pengaku juga mampu untuk menahan area sambungan dari terjadinya pelepasan. Disamping itu, dapat diamati pula terjadinya flanges buckling terjadi pada kedua ujung link yang disebabkan oleh pemberian beban siklik. Namun dalam pemodelan, perlu dilakukan pemilihan balok induk dengan ketebalan yang sesuai, agar balok induk tetap dalam kondisi elastis. Balok induk pada spesimen WBRL3 mencapai kondisi plastis setelah diberi beban siklik hingga siklus ke-52 sehingga perencanaan elemen di luar balok link perlu dikaji lebih lanjut.

D. Spesimen WBRL4

Hasil pemodelan ditunjukkan dalam kurva histeresis pada **Gambar 14**. Beban geser yang mampu ditahan oleh link adalah sebesar 874.48 kN pada saat link mengalami rotasi sebesar 0.089 rad. Persebaran tegangan pada spesimen dapat dilihat pada **Gambar 12**. Sebagian bidang geser pada daerah sambungan telah mencapai tegangan 370 MPa, sedangkan lainnya telah mencapai kondisi leleh dengan tegangan 244 MPa hingga 370 MPa.

Pengujian spesimen WBRL4 menunjukkan bahwa spesimen mengalami kondisi leleh pertama yaitu pada saat spesimen mengalami siklus pembebanan ke-16 yaitu dimana spesimen mengalami displacement sebesar 6.05 mm. Bagian sambungan pada link mengalami pelepasan terlebih dahulu dan kemudian pelepasan bergeser ke bagian web dan sambungan di sisi kanan. Sedangkan kondisi ultimate pertama terjadi pada siklus ke-46 dengan displacement yang dialami spesimen sebesar 25.96 mm. Pembebanan kemudian dihentikan ketika mencapai siklus ke-52.

Dari **Gambar 14**, dapat dilihat bahwa link mengalami pelepasan pertama pada saat terjadi rotasi link sebesar 0.0090 rad, yaitu pada saat link mampu mendisipasi shear force sebesar 486.23 kN. Sedangkan pada saat link berotasi sebesar 0.037 rad, link telah mencapai tegangan ultimate pertamanya, yaitu ketika link mampu mendisipasi shear force senilai 736.57 kN. Kondisi spesimen WBRL4 ketika mencapai tegangan leleh serta tegangan ultimate pertama dapat dilihat pada **Tabel 8**.



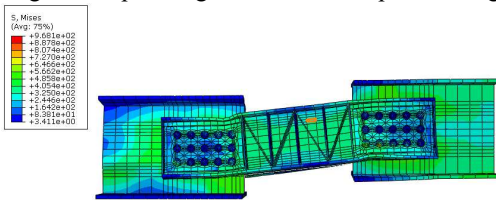
Gambar 14. Kurva histeresis WBRL4
 Sumber: Hasil Analisis

Tabel 8. Kondisi Leleh dan Ultimate pada WBRL4

	Siklus Ke-	Displacement (mm)	Rotation (rad)	Shear Force (kN)
Leleh Awal	16	6.05	0.009	486.23
Ultimate Awal	46	25.96	0.037	736.57
Gaya Maks	52	69.92	0.089	874.48

Sumber: Hasil Analisis

Persebaran tegangan pada spesimen dapat dilihat pada **Gambar 15**. Sebagian bidang geser pada daerah sambungan telah mencapai tegangan 370 MPa, sedangkan lainnya telah mencapai kondisi leleh dengan tegangan 244 MPa hingga 370 MPa. Dari gambar distribusi tegangan *von mises*, dapat dilihat bahwa tegangan pada bagian sambungan memiliki nilai yang besar karena adanya perlemahan yang diakibatkan oleh lubang baut. Namun, adanya plat pengaku pada sambungan mampu menghambat *ovalized* pada lubang baut.



Gambar 15. Distribusi tegangan pada WBRL4
 Sumber: Hasil Analisis

Kemudian, hasil berupa nilai *shear force* serta *rotation* yang didapatkan dari keseluruhan pemodelan dapat dilihat pada **Tabel 9**.

Tabel 9. Hasil Pemodelan Numerik Spesimen Uji

No	Spesimen	Shear Force (kN)	Rotation (γ) (rad)
1	WBRL1	671.37	0.093
2	WBRL2	676.79	0.096
3	WBRL3	773.69	0.900
4	WBRL4	874.27	0.089

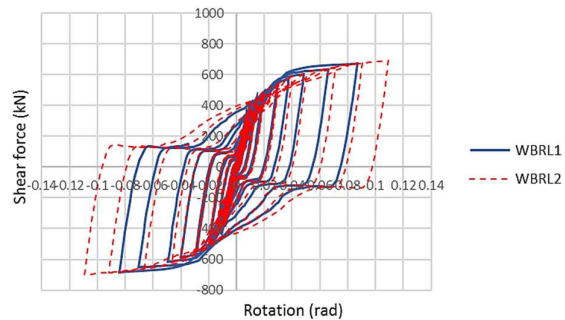
Sumber: Hasil Analisis

E. Perbandingan Perilaku Seismik

1) WBRL1 dan WBRL2

Hasil pemodelan numerik dari keempat spesimen dibandingkan untuk mengetahui bagaimana pengaruh variabel yang diberikan pada model uji. **Gambar 16** hingga **Gambar 18** menunjukkan masing-masing perbandingan kurva histeresis antara WBRL1 dan WBRL2, WBRL1 dan WBRL3, serta WBRL1 dengan WBRL4.

Pada **Gambar 16** menunjukkan pemberian *diagonal stiffeners* pada *link* memberikan pengaruh pada hasil pemodelan namun tidak begitu signifikan. Pemberian *diagonal stiffeners* pada WBRL2 menyebabkan *link* menjadi semakin kaku sehingga menghambat pelelehan terjadi pada bagian *web*. Pemberian *diagonal stiffeners* menjadikan *link* mampu menahan gaya geser lebih besar, tetapi kemampuan menahan gaya geser yang dimiliki tidak jauh berbeda dengan kemampuan disipasi spesimen WBRL1. Namun penambahan *diagonal stiffeners* pada spesimen menjadikan kurva histeresis yang dihasilkan lebih lebar, dan kemampuan mendisipasi energi yang lebih baik.



Gambar 16. Perbandingan kurva histeresis WBRL1 dan WBRL2.

Sumber: Hasil Analisis

Energi disipasi yang dihasilkan oleh spesimen uji didapatkan dengan cara menghitung luasan kurva hysteresis hasil dari pembebanan siklik dimana pada pengujian pembebanan yang diberikan sebesar 72 mm secara bertahap hingga 52 siklus. Spesimen WBRL1 dan WBRL2 memiliki selisih 1.123% dalam kemampuannya mendisipasi energi. Spesimen WBRL2 mampu mendisipasi energi lebih baik jika dibandingkan dengan WBRL1. Sedangkan untuk daktilitas spesimen, WBRL2 memiliki nilai daktilitas 1.032% lebih besar dibandingkan dengan spesimen WBRL1.

Tabel 10. Perbandingan Energi Disipasi Spesimen WBRL1 dan WBRL2

Spesimen	Energi Disipasi (kNmm)	Selisih (%)
WBRL1	97276.84	
WBRL2	109285.1	1.123

Sumber: Hasil Analisis

Nilai daktilitas didapatkan dengan membagi nilai *displacement* (Δ) pada saat leleh pertama dengan nilai *displacement* pada saat kondisi *ultimate*. Daktilitas keduanya mampu mencapai syarat struktur daktail yaitu 4. Dari hasil pengujian dapat diketahui bahwa spesimen WBRL2 memiliki nilai daktilitas 0.98% lebih besar dibandingkan dengan spesimen WBRL1. Kemampuan spesimen dalam mendisipasi energi serta nilai daktilitas dari hasil analisa numerik dapat dilihat pada **Tabel 10** dan **Tabel 11**.

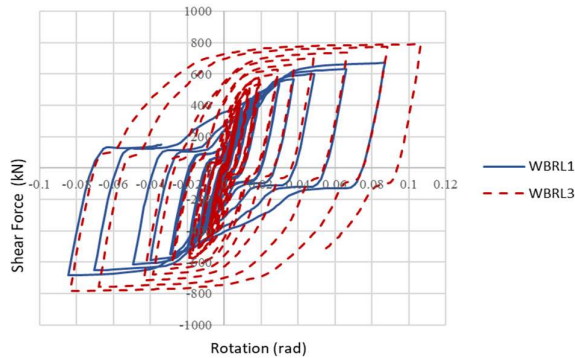
Tabel 11. Perbandingan Daktilitas Spesimen WBRL1 dan WBRL2

Spesimen	Δ leleh pertama (mm)	Δ ultimate (mm)	Daktilitas	Selisih (%)
WBRL1	5.05	21.21	4.2	
WBRL2	4.08	16.17	4.1	0.98

Sumber: Hasil Analisis

2) WBRL1 dan WBRL3

Perbandingan kurva histeresis hasil uji numerik spesimen WBRL1 dengan WBRL3 diilustrasikan pada **Gambar 17**. Pemberian variasi berupa pengaku pada *web-connection* berdampak signifikan pada nilai rotasi serta besarnya gaya geser yang diterima oleh spesimen. Pemberian plat pengaku pada sambungan mampu meminimalisir terjadinya kegagalan tumpu pada sambungan sehingga *link* dapat menahan gaya geser lebih besar 1.91% dari WBRL1.



Gambar 17. Perbandingan kurva histeresis WBRL1 dengan WBRL3

Sumber: Hasil Analisis

Disamping itu, *pinching effect* yang dihasilkan kedua spesimen pun berbeda. Area sambungan yang lebih kaku pada WBRL3 dapat meminimalisir terjadinya *pinching effect* pada *link*. Hal tersebut karena *web-connection plate* mampu menahan area sambungan dari terjadinya *ovalized* akibat pembebanan siklik. Selain itu, pemberian *web-connection plate* berdampak pada semakin kakunya area sambungan sehingga spesimen mampu menghasilkan rotasi *link* sebesar 1.2% lebih besar bila dibandingkan dengan model validasi WBRL1.

Perbandingan kemampuan spesimen dalam mendisipasi energi dan daktilitas antara WBRL1 dengan WBRL3 disajikan dalam **Tabel 12** dan **Tabel 13**. Hasil dari analisa didapatkan spesimen WBRL3 mampu mendisipasi energi 1.48% lebih besar dibandingkan model validasi WBRL1. Sedangkan untuk daktilitas, spesimen WBRL3 memiliki nilai daktilitas 1.01% lebih besar dibandingkan dengan WBRL1. Dapat pula dilihat pada kedua spesimen, daktilitas keduanya mampu melampaui nilai 4, dimana batas minimum suatu struktur dikatakan merupakan struktur yang daktail adalah 4.

Tabel 12. Perbandingan Energi Disipasi Spesimen WBRL1 dan WBRL2

Spesimen	Energi disipasi (kNmm)	Selisih (%)
WBRL1	97276.84	
WBRL3	144068.5	1.48

Sumber: Hasil Analisis

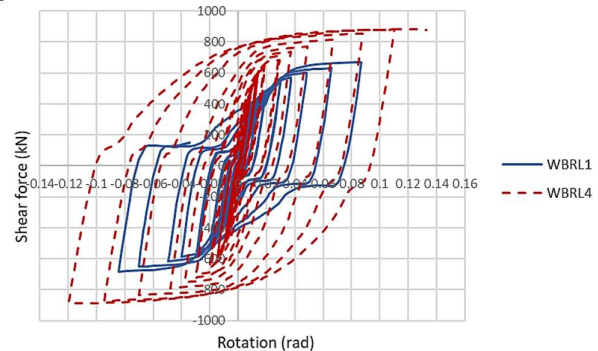
Tabel 13. Perbandingan Daktilitas Spesimen WBRL1 dan WBRL3

Spesimen	Δ leleh pertama (mm)	Δ ultimate (mm)	Daktilitas	Selisih (%)
WBRL1	5.05	21.21	4.2	
WBRL3	5.42	22.98	4.24	1.01

Sumber: Hasil Analisis

3) WBRL1 dan WBRL4

Hasil perbandingan kurva hysteresis hasil pengujian numerik pada WBRL1 dan WBRL4 dapat dilihat pada **Gambar 18**. Pengaplikasian kedua variabel, penambahan *diagonal stiffeners* serta *connection plate*, mampu mengakomodasi *link* untuk menerima gaya geser lebih besar. Efek *pinching* yang terjadi pada kedua spesimen pun juga dapat diamati bahwa spesimen WBRL4 mampu meminimalisir efek tersebut pada *replaceable link*. Selain itu, penambahan *diagonal stiffener* serta plat pengaku pada bagian sambungan membuat spesimen kurang fleksibel dalam menahan rotasi spesimen *replaceable link* akibat pemberian beban siklik.



Gambar 18. Perbandingan kurva histeresis WBRL1 dengan WBRL3

Perbandingan kemampuan spesimen dalam mendisipasi energi dan daktilitas antara WBRL1 dengan WBRL4 disajikan dalam **Tabel 14** dan **Tabel 15**. Hasil dari analisa didapatkan bahwa *link* mampu mendisipasi energi 1.91% lebih besar dibanding WBRL1. Sedangkan untuk daktilitas, spesimen WBRL4 memiliki nilai daktilitas 1.02% lebih besar dibandingkan dengan WBRL1. Dapat pula dilihat pada kedua spesimen, daktilitas keduanya mampu melampaui nilai 4.

Tabel 14. Perbandingan Energi Disipasi Spesimen WBRL1 dan WBRL4

Spesimen	Energi Disipasi (kNmm)	Selisih (%)
WBRL1	97276.84	
WBRL4	185951.09	1.91

Tabel 15. Perbandingan Daktilitas Spesimen WBRL1 dan WBRL3

Spesimen	Δ Leleh pertama (mm)	Δ Ultimate (mm)	Daktilitas	Selisih (%)
WBRL1	5.05	21.21	4.2	
WBRL4	6.05	25.96	4.29	1.02

4. Simpulan

Berdasarkan pemodelan secara numerik pada *web-bolted replaceable link*, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemberian variasi berupa *diagonal stiffeners* serta *web-connection plate* menghasilkan perbedaan yang signifikan terhadap hasil analisa. Pemberian *web-connection plate* mampu mengakomodasi *link* untuk mampu menahan gaya geser lebih besar, namun menghasilkan rotasi yang lebih kecil. Pengkombinasian keduanya mampu menghasilkan *link* dengan performa disipasi energi yang lebih baik. Namun, pemberian *diagonal stiffeners* saja pada elemen hanya mampu memberikan peningkatan kekuatan serta rotasi yang kecil yaitu hanya sebesar 1% untuk gaya geser dan 1.03% untuk nilai rotasi.
2. Dalam kemampuan spesimen dalam menahan gaya geser, spesimen WBRL1 mampu menahan gaya reaksi sebesar 671,37 kN. Kemampuan mendisipasi energi geser terbaik dilakukan oleh spesimen WBRL4. Apabila dibandingkan dengan spesimen uji lain, WBRL4 mampu mendisipasi gaya geser 1.31% lebih besar dibandingkan dengan WBRL1.
3. Dalam kemampuan *link* menahan rotasi, keseluruhan spesimen mampu melampaui persyaratan rotasi yang diberikan yaitu 0.08 rad untuk *link* geser. Namun penambahan *diagonal stiffener* ataupun *web-connection plate* menjadikan link kurang fleksibel dalam menahan rotasi akibat pembebanan.
4. Dalam kemampuan spesimen dalam mendisipasi energi, spesimen WBRL1 mampu mendisipasi energi sebesar 97276.84 kNmm. Pada WBRL4, spesimen mampu

mendisipasi energi 1.48% lebih besar bila dibandingkan dengan WBRL1.

5. Seluruh spesimen uji mampu melampaui nilai daktilitas yang disyaratkan yaitu rata-rata mampu mencapai daktilitas dengan nilai 4.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Budiono, D. Kusumastuti, and H. D. Setio, "Numerical Study on the Modification of Long Links in Eccentrically Braced Frame," vol. 020017, 2017.
- [2] T. Okazaki and M. D. Engelhardt, "Cyclic loading behavior of EBF links constructed of ASTM A992 steel," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 63, no. 6, pp. 751–765, 2007.
- [3] M. Lian and M. Su, "Experimental study and simplified analysis of EBF fabricated with high strength steel," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 139, pp. 6–17, 2017.
- [4] B. Suswanto, A. Rizki, E. Wahyuni, and J. Wilson, "Numerical Behavior Study of Short Link, Intermediate Link and Long Link in Eccentrically Braced Frame Steel Structure," vol. 12, no. 21, pp. 11460–11471, 2017.
- [5] S. Li, Y. H. Liu, and J. B. Tian, "Experimental and Analytical Study of Eccentrically Braced Frames Combined with High-Strength Steel," *Int. J. Steel Struct.*, vol. 18, no. 2, pp. 528–553, 2018.
- [6] M. A. Musmar, "Effect Of Link On Eccentrically Braced Frames," vol. 40, no. 1, pp. 35–43, 2012.
- [7] S. H. Hashemi, "Ductility and Ultimate Strength of Eccentric Braced Frame," vol. 15, pp. 68–74, 2011.
- [8] N. Mansour, Y. Shen, C. Christopoulos, and R. Tremblay, "Experimental Evaluation Of Nonlinear Replaceable Links In Eccentrically Braced Frames and Moment Resisting Frames," *14th World Conf. Earthq. Eng.*, no. 2003, 2008.
- [9] X. Ji, Y. Wang, Q. Ma, and T. Okazaki, "Cyclic Behavior of Replaceable Steel Coupling Beams," *J. Struct. Eng. (United States)*, vol. 143, no. 2, pp. 1–11, 2017.
- [10] N. Mansour, C. Christopoulos, and R. Tremblay, "Experimental validation of replaceable shear links for eccentrically braced steel frames," *J. Struct. Eng.*, vol. 137, no. 10, pp. 1141–1152, 2011.
- [11] K. G. Tan and C. Christopoulos, "Development of Replaceable Cast Steel Links for Eccentrically Braced Frames," *J. Struct. Eng. (United States)*, vol. 142, no. 10, 2016.
- [12] J. B. Mander, "Seismic Design of Bridge Piers." University of Canterbury, Christchurch, p. 395, 1983.
- [13] M. A. Rofiq, H. Alrasyid, D. Iranata, and D. Irawan, "Prediksi Perilaku Lentur Kolom Beton Bertulang Mutu Tinggi Terhadap Kombinasi Beban Perpindahan Monotonik dan Aksial Rendah," *J. Apl. Tek. Sipil*, vol. 17, no. 1, p. 43, 2019.
- [14] M. Moestopo, D. Kusumastuti, E. Lim, U. Akbar, and M. S. Ramadhita, "Experimental Study on the Seismic Behavior of Replaceable Shear Links Connected to

- Coupling Beam,” vol. 8, no. 2, pp. 532–539, 2018.
- [15] Departemen Pekerjaan Umum, “Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung,” *Standar Nas. Indones.*, 2002.
- [16] A. American and N. Standard, “Seismic Provisions for Structural Steel Buildings,” 2005.
- [17] P. W. Richards and C. Uang, “Effect of Flange Width-Thickness Ratio on Eccentrically Braced Frames Link Cyclic Rotation Capacity,” no. October, pp. 1546–1552, 2005.
- [18] J. W. Gooch, “Coefficient of Friction,” *Encyclopedic Dictionary of Polymers*. pp. 151–151, 2011.
- [19] S. N. Indonesia and B. S. Nasional, “Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural,” 2015.
- [20] J. E. Salmon, Charles G. Johnson, *uktur Baja Desain dan Perilaku Jilid I*, Dua. Erlangga, 1997.

