



PERBANDINGAN PERILAKU SIKLIK ELEMEN REPLACEABLE LINK MATERIAL BAJA KONVENSIONAL DENGAN LOW YIELD POINT STEEL (LYS)

AULIA INDIRA KUMALASARI^{1*}, BUDI SUSWANTO², HIDAJAT SUGIHARDJO²

¹Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Malang, Malang, Jawa Timur

²Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Jawa Timur

*Corresponding author: ✉ auliaindira@umm.ac.id

Naskah diterima : 1 Desember 2021. Disetujui: 22 Februari 2022

ABSTRAK

Selama ini di dalam desain struktur *Eccentrically Braced Frames* (EBF), link selalu didesain secara menyatu dengan balok lantai sehingga menyebabkan terjadinya *overstrength* pada bagian tersebut. Selain itu, desain tersebut juga menjadikan perbaikan pasca gempa menjadi kurang efisien baik dalam segi waktu serta biaya. Selama satu dekade ini, mulai banyak penelitian yang memodelkan *replaceable link* dengan berbagai pengembangan untuk mendapatkan elemen yang daktail ketika menghadapi gempa, begitu juga dengan penelitian ini. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perilaku *link* dengan berbagai macam material terhadap daktilitas, energi disipasi, deformasi dan rotasi, serta pola kegagalan pasca terjadi gempa. Pada penelitian ini dilakukan pengujian terhadap empat spesimen *web bolted replaceable link* dengan variasi material baja konvensional dan juga baja *low yield point* (LYS). Analisa dilakukan dengan metode numerik yaitu dengan mengaplikasikan beban siklik bolak balik pada elemen *link*. Beban tersebut kemudian dikontrol terhadap perpindahan di salah satu ujung *link*. Kemudian hasil pengujian dianalisa berdasarkan daktilitas, energi disipasi, deformasi, serta pola kegagalan. Hasil pemodelan menunjukkan *link* dengan tipe sambungan *web bolted* menghasilkan kurva dengan *pinching effect* yang disebabkan oleh sambungan baut. Selain itu, *link* LYS100 menunjukkan nilai rotasi yang besar dikarenakan material tersebut memiliki regangan *ultimate* yang lebih besar dibanding dengan baja konvensional. Dari pemodelan numerik didapatkan bahwa *replaceable link* dengan material LYS hasilnya sebanding dengan *link* dengan baja konvensional serta *link* tersebut mampu memenuhi persyaratan terkait daktilitas, kemampuan mendisipasi energi, serta besar rotasi yang dihasilkan.

Kata kunci : *eccentrically braced frames, replaceable link, low yield steel, abaqus, daktilitas.*

1. PENDAHULUAN

Perbaikan struktur EBF pasca terjadi gempa mulai mendapat perhatian khusus setelah terjadinya gempa di New Zealand pada tahun 2010 dan 2011 (Mehmet Bakır Bozkurt & Topkaya, 2018). Namun, perbaikan struktur pasca gempa memiliki kelemahan yaitu biaya yang

mahal serta lamanya pemulihan kegiatan masyarakat di sekitar gedung. Salah satu solusi untuk mengatasi hal tersebut adalah dengan mengembangkan komponen yang mudah diganti pada bagian mendisipasi energi suatu struktur (Ji et al., 2017).

Elemen *link* pada *Eccentrically braced frames* (EBF) adalah elemen balok horizontal yang menyambungkan antara balok dengan bresing yang fungsinya adalah sebagai elemen mendisipasi energi (Dubina et al., 2008; Lian & Su, 2017). Pada saat terjadi gempa, pemodelan struktur EBF umumnya didesain dengan link yang menyatu dengan balok lantai. Pemodelan tersebut tidak jarang menjadikan struktur lainnya mengalami *overstrength* (Mansour et al., 2011; Yin et al., 2019). Selain itu, *link* yang didesain menyatu dengan balok menjadi suatu permasalahan apabila perancang ingin melakukan perbaikan pada gedung pasca gempa. Apabila kerusakan akibat gempa dapat dibatasi hanya pada salah satu elemen saja dan kemudian dapat diganti pasca terjadi gempa, maka dapat dipastikan biaya serta waktu perbaikan dapat dikurangi seefisien mungkin (Dubina et al., 2008). Sehingga banyak peneliti yang mulai memodelkan elemen *link* yang dapat dilakukan pergantian pada saat setelah gempa tanpa harus merusak struktur utamanya.

Dalam satu dekade ini, telah banyak dikembangkan elemen *link* yang dapat diganti (*replaceable*) dengan berbagai macam tipe baik berdasarkan material yang digunakan, geometri elemen, sambungan, dan sebagainya (Mehmet Bakır Bozkurt & Topkaya, 2018). Link sendiri adalah suatu elemen yang akan bertindak sebagai sekering (*fuse*) yang bersifat daktail untuk mendisipasi energi melalui pelelehan geser (H. Zhang et al., 2020).

Penelitian tentang pengaruh jenis material baja dalam penggunaan *link* telah dikembangkan untuk menemukan *link* yang mampu mendisipasi energi dengan lebih baik. Hasil menunjukkan bahwa material *low yield point steel* (LYS) dapat digunakan sebagai alternatif pemilihan material karena sifatnya yang daktail dan mampu menahan deformasi plastis yang besar (C. Zhang et al., 2016). Selain itu, *link* dengan LYS mampu menunjukkan kestabilan energi disipasi serta memenuhi kapasitas rotasi yang disyaratkan (H. Zhang et al., 2020). Namun untuk LYS dengan tegangan leleh 100 MPa (LYS100), beberapa perhatian perlu diberikan untuk mencegah terjadinya kegagalan pada bagian *web link* (Dusicka et al., 2010).

Selain terkait material, penelitian untuk mengembangkan elemen *replaceable link* terkait geometri serta sambungan yang digunakan juga banyak dilakukan studinya. Penelitian menunjukkan bahwa berbagai macam geometri dapat diaplikasikan pada elemen *replaceable link*. Beberapa geometri link mampu meningkatkan kapasitas rotasi serta meningkatkan daktilitas pada link (Mahmoudi et al., 2019; Tan & Christopoulos, 2016). Selain itu, penambahan area geser pada link juga dapat meningkatkan kapasitas disipasinya serta rotasinya (Park et al., 2021). Namun dalam penyusunannya perlu diperhatikan karena beberapa hal dapat mempengaruhi daktilitas serta kemampuan *link* dalam mendisipasi energi seperti panjang link, jumlah pengaku (*stiffeners*) yang digunakan, pemberian perforasi pada bagian web (Tong et al., 2018; Yin et al., 2019).

Kemampuan disipasi energi pada *replaceable link* erat kaitannya dengan pengaruh pada detail sambungannya. Sambungan *end plate link* menunjukkan perilaku yang serupa dengan *link* konvensional pada umumnya (Mansour et al., 2011). Selain itu, penggunaan plat yang lebih tipis pada *end plate link* juga mampu mengakomodasi *link* untuk berotasi dengan baik (Özkılıç & Topkaya, 2021). Sedangkan untuk sambungan baut pada bagian web *link* menunjukkan bahwa link lebih fleksibel saat berotasi karena pengaruh tumpuan *bearing* pada baut yang digunakan (Mehmet Bakır Bozkurt & Topkaya, 2017; Mehmet Bakır Bozkurt et al., 2019; Mehmet Bakır Bozkurt & Topkaya, 2018; Mansour et al., 2011).

Diketahui dari penelitian sebelumnya bahwa *link* dengan *web bolted* memiliki fleksibilitas tinggi dengan kemampuannya untuk berotasi dengan baik (Mansour et al., 2011). Penelitian lain juga menunjukkan bahwa material LYS memiliki regangan ultimate (ϵ_u) yang nilainya lebih besar dibanding dengan baja konvensional. Hal tersebut menunjukkan bahwa material LYS mampu menunjukkan daktilitas yang lebih baik (H. Zhang et al., 2020). Selain itu, penggunaan *stiffener* pada *link* juga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap proses pelelehan serta kestabilan kemampuan *link* dalam mendisipasi energi (Yin et al., 2019).

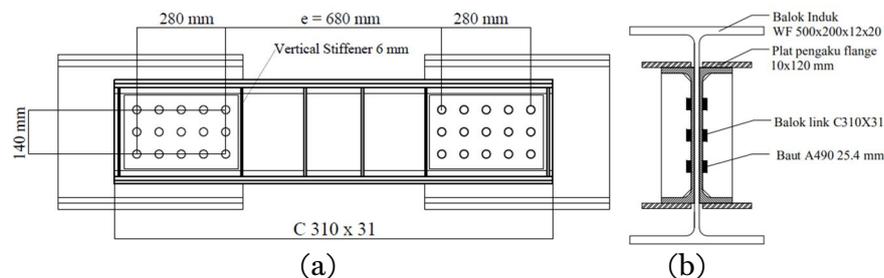
Penelitian eksperimental serta analisa numeris pada penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa *link* yang cenderung menahan gaya geser mampu menghasilkan daktilitas serta stabilitas dalam menahan gaya gempa. Dari hal tersebut, peneliti ingin melakukan studi terkait dengan perilaku elemen *replaceable link*, khususnya *link* geser, dengan memberikan perbandingan berupa material penyusun baja LYS serta baja konvensional apabila diberi beban siklik. Penelitian tersebut dianalisa terhadap daktilitas, energi disipasi, deformasi dan rotasi, serta pola kegagalan pasca terjadi gempa. Dengan studi tersebut peneliti berharap mampu menghadirkan inovasi *link* yang memiliki tingkat kestabilan disipasi energi serta daktilitas yang lebih baik sehingga mampu memenuhi kebutuhan akan *link* yang daktil serta efisien dalam penggunaannya.

2. METODA PENELITIAN

2.1. Properti Material dan Geometri

Analisa data pada penelitian ini dilakukan secara numerik untuk mengamati perilaku *link* setelah diberi pembebanan dengan *boundary condition* yang telah diberikan. Beberapa parameter akan diamati serta dianalisa meliputi pengaruh material BJ41, LYS100, LYS160, dan LYS225 terhadap kurva *hysteresis* yang dihasilkan, rotasi *link*, perubahan deformasi elemen akibat pembebanan, daktilitas, serta pola kegagalan. Hasil analisa tersebut akan menunjukkan *link* yang direncanakan telah mampu memenuhi persyaratan yang diberikan ataukah sebaliknya.

Link yang diuji mengadopsi model *web bolted replaceable link* dimana *link* tersebut disusun dari dua buah profil *C-channel* yang dipasang saling membelakangi seperti pada **Gambar 1** dengan ketentuan profil yang digunakan adalah C310x3 (Mansour et al., 2011). Profil tersebut memiliki ukuran pada bagian *flanges* dan *web*nya adalah sebesar: 1] lebar x ketebalan *flanges* 74 mm x 12.4 mm, 2] tinggi x ketebalan *web* 305 mm x 7.2 mm. Dari data profil dapat diketahui bahwa ketebalan bagian *flanges* lebih besar dibandingkan dengan *web* dimana hal tersebut digunakan untuk mendukung terjadinya pelelehan geser terjadi secara merata pada bagian *web*. Untuk tambahan lain, komponen yang digunakan adalah pengaku web dengan ukuran 279.6 mm x 66.8 mm x 6 mm.



Gambar 1. (a) *Link* model *web bolted replaceable* dengan sambungan baut di kedua ujungnya. (b) potongan melintang *replaceable link*

Keempat spesimen yang diuji memiliki material seperti yang dapat dilihat pada **Tabel 1**. Sejumlah empat buah spesimen *link* dimodelkan dimana salah satu *link* dimodelkan menggunakan material baja konvensional BJ41 dan tiga lainnya menggunakan baja LYS100, LYS160, serta LYS225. Material BJ41 sendiri memiliki nilai f_y 250 MPa dan nilai f_u 410 MPa. Properties dari material yang digunakan tertulis di **Tabel 1** sedangkan untuk titik leleh dan *ultimate* LYS dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 1. Elemen penyusun *replaceable link*

No	Nama Spesimen	Elemen Penyusun	Material	Dimensi
1	L-BJ41	Balok Induk	BJ 55	WF 500x200x12x20
		Balok <i>Link</i>	BJ 41	C310x31
		<i>Stiffeners Web</i>	BJ 41	279.6x66.8x6 mm
		Baut	A490	25.4 mm
2	L-LYS100	Balok Induk	BJ 55	WF 500x200x12x20
		Balok <i>Link</i>	LYS100	C310x31
		<i>Stiffeners Web</i>	LYS100	279.6x66.8x6 mm
		Baut	A490	25.4 mm
3	L-LYS160	Balok Induk	BJ 55	WF 500x200x12x20
		Balok <i>Link</i>	LYS160	C310x31
		<i>Stiffeners Web</i>	LYS160	279.6x66.8x6 mm
		Baut	A490	25.4 mm
4	L-LYS225	Balok Induk	BJ 55	WF 500x200x12x20
		Balok <i>Link</i>	LYS225	C310x31
		<i>Stiffeners Web</i>	LYS225	279.6x66.8x6 mm
		Baut	A490	25.4 mm

Pemberian nama spesimen diberikan dengan mengikuti aturan: Abjad pertama L mengacu pada *link beam*, sedangkan BJ41 dan LYS100, LYS160, dan LYS225 mengacu pada material yang digunakan. Untuk material yang digunakan dalam pemodelan yaitu adalah LYS100 LYS160 dan LYS225 yang dipilih berdasarkan penelitian sebelumnya. Dan kemudian *link* dengan ketiga material tersebut dibandingkan dengan *link* yang menggunakan material BJ41 dimana material BJ41 adalah material baja yang umum digunakan di dunia konstruksi. Spesifikasi material yang digunakan tertulis pada **Tabel 2**.

Hasil pengujian terhadap kapasitas tegangan dan regangan material LYS telah dilakukan pada penelitian sebelumnya melalui uji *coupon test*. Hasil dari *coupon test* tersebut kemudian digunakan sebagai representasi dari material dasar yang akan digunakan. Hasil *test* menunjukkan bahwa seluruh material LYS yang diuji mampu menghasilkan tegangan leleh (*yield stress*) yang rendah namun memiliki deformasi plastis yang besar. Hasil pengujian untuk material LYS100, LYS160, dan LYS225 menunjukkan bahwa masing-masing spesimen mampu mencapai persentase regangan material sebesar 43.7%, 44.5% , dan 35.4% dimana pada umumnya, baja struktural konvensional memiliki nilai persentase regangan material kurang lebih sebesar 20%. Hasil *coupon test* terhadap material LYS ditunjukkan pada **Tabel 2**. (C. Zhang et al., 2016).

Tabel 2. Properties Material *Low Yield Point Steel*

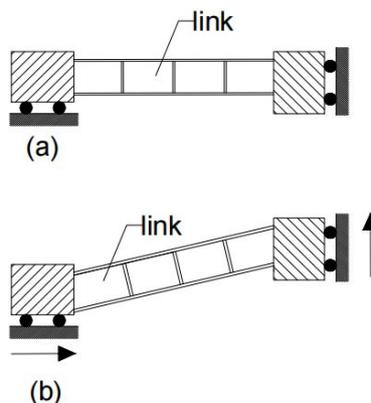
Jenis Baja	Tegangan putus minimum, f_u (MPa)	Tegangan leleh minimum, f_y (MPa)	Peregangan Minimum (%)
LYS100	364	97.58	43.7
LYS160	487	148	44.5
LYS225	389	235.75	35.4

Balok *link* pada dasarnya didesain sebagai elemen *fuse* pada spesimen *eccentrically braced frames* (EBF). Pada struktur EBF, *link* pendek/*shear link* ($e < M_p/V_p$) lebih diutamakan penggunaannya daripada *link* panjang/*flexural link* ($e > 2.4M_p/V_p$). Berdasarkan nilai f_y , M_p , dan V_p masing-masing spesimen, maka dapat ditentukan dimensi panjang *link* (e) dipilih 680 mm. Jarak tersebut dihitung berdasarkan jarak diantara baris pertama baut di kedua ujungnya. Sedangkan untuk melihat pengaruh sambungan baut terhadap balok *link* dan efeknya terhadap rotasi *link*, baut A490 digunakan, dimana baut tersebut memiliki nilai $f_y = 896 \text{ MPa}$ yang masuk dalam katagori baut mutu tinggi. Untuk elemen lainnya tertulis dalam Tabel 1.

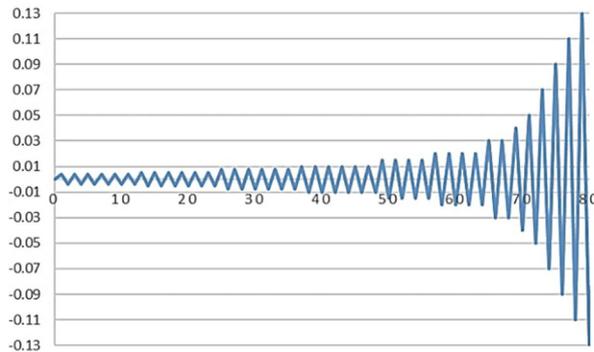
2.2. Pemodelan *Finite Element*

Replaceable link dimodelkan dengan *finite element program* ABAQUS/CAE 6.14 *student version* dan kemudian hasilnya akan dievaluasi berdasarkan perilaku elemen setelah diberi pembebanan. Hasil dari pemodelan akan digunakan untuk memprediksi perilaku global *link* dan pengurangan kekuatan akibat adanya tekuk, robekan, dan lainnya. Pemodelan disusun berdasarkan material yang dipilih dimana masing-masing material memiliki berat jenis sebesar 7.8 km/m^3 , modulus elastisitas (E) sebesar $206 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ dan *poisson's ratio* (ν) 0.3. Pemodelan numeris dilakukan dengan menggunakan elemen *Brick* tipe C3D8R dengan ukuran *mesh* 40 mm. Untuk interaksi antar elemen, bagian-bagian *link* yang dianggap menggunakan sambungan las dimodelkan dengan tipe interaksi *tie constraint*. Sedangkan untuk permukaan yang menghasilkan gaya geser seperti kedua ujung profil C dengan balok lantai, dipilih interaksi jenis *surface to surface* dengan tipe *hard contact*. Mengingat adanya gaya geser yang timbul akibat pembebanan di kedua permukaan profil C dan baok WF, koefisien 0.42 diaplikasikan pada interaksi permukaan *hard contact* tersebut (Gooch, 2011).

Pemodelan terkait *boundary condition* diilustrasikan seperti pada Gambar 2. Nodal-nodal yang ada pada sebelah kiri seluruhnya dibatasi terhadap semua pergerakan rotasi. Beban sesuai dengan AISC 341-10 diberikan dengan bentuk perpindahan arah vertikal pada seluruh nodal di bagian kanan, sedangkan nodal sebelah kiri diberikan kebebasan untuk bergerak arah horizontal. Beban yang diberikan dimulai pada 0.0075 rad untuk mengurangi waktu perhitungan komputasi. *Loading protocol* yang digunakan seperti yang tertera pada Gambar 3 yang menyesuaikan dengan pembebanan siklik AISC 2005. Pembebanan ini dilakukan untuk menghasilkan *link* dengan gaya geser konstan di sepanjang elemennya dan memiliki besar momen yang sama di kedua ujungnya (Richards & Uang, 2005).



Gambar 2. *Boundary Condition* (a) sebelum pembebanan, (b) pada saat pembebanan



Gambar 3. Beban siklik berdasarkan AISC 2005

Hasil pemodelan kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimental elemen *replaceable link* oleh Mansour. Pada penelitian tersebut *link* mampu menerima rotasi seperti yang disyaratkan ($\gamma > 0.08 \text{ rad}$). Namun, dapat diamati pula bahwa *link* mengalami robekan (*tearing*) pada bagian *web* yang diakibatkan oleh gaya geser yang dihasilkan pembebanan. Selain itu, *pinching effect* dapat diamati pada kurva *hysteresis* yang dihasilkan. Efek tersebut timbul karena terjadinya *ovalization* pada lubang baut, dimana pembebanan siklik memberikan tegangan yang besar di area sambungan sehingga area sekitar lubang baut mengalami pelelehan terlebih dahulu (Mansour et al., 2011).

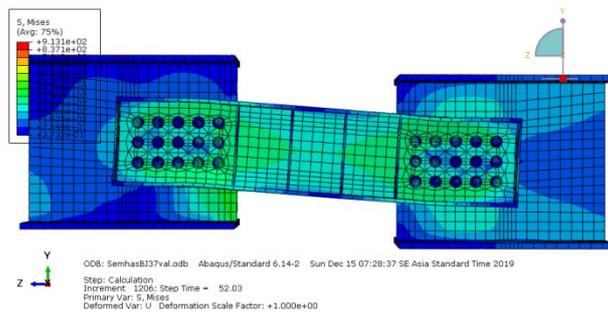
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Mode Kegagalan

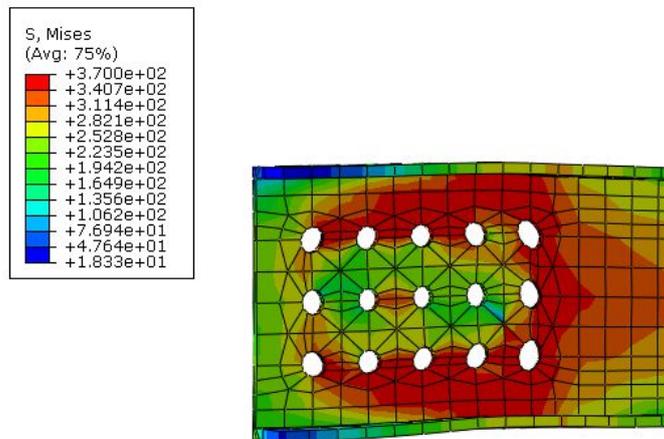
Pelelehan merata pada bagian *web link* ditunjukkan dengan gradasi warna hijau dan biru yang menandakan pada daerah tersebut nilai tegangan di daerah bidang geser bervariasi antara: 1] untuk spesimen L-BJ41, nilai tegangan pada daerah *web* antara 300 MPa hingga 376 MPa, 2] pada spesimen L-LYS100, nilai tegangan pada daerah *web* antara 151 MPa hingga 303 MPa, 3] spesimen L-LYS160, nilai tegangan pada daerah *web* antara 225 MPa hingga 300 MPa, serta 4] spesimen L-LYS225, nilai tegangan pada daerah *web* antara 226 MPa hingga 376 MPa dimana pelelehan tersebut terjadi merata di sepanjang *web* yang diakibatkan salah satunya adalah ketebalan bagian *web* yang lebih tipis dibandingkan dengan bagian *flange* menyebabkan energi ditransfer lebih besar ke gaya geser di bagian *web* dibandingkan gaya tersebut ditransfer menjadi *flexure* pada bagian *flanges*. Pendistribusian tegangan pada *link* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Dari hasil pemodelan yang telah dilakukan, didapatkan hasil bahwa tegangan terbesar terjadi pada bagian sambungan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Pada awal pembebanan, sambungan pada bagian *link* bersifat *rigid* karena baut masih mengikat sambungan dengan sangat kuat. Setelah mengalami beberapa proses pembebanan, sambungan mulai mengalami *slip* dan *link* disekitar baut mengalami pelelehan. Selama mengalami kenaikan gaya geser, baut mengalami bearing lebih besar, sehingga pelelehan dan *ovalized* pada lubang baut terjadi. Dan ketika pembebanan dikembalikan ke nilai *displacement* 0 mm, sambungan akan kembali ke perilaku *rigid*. Kemudian setelah dibebani kembali baut akan mengalami *slip* lagi dan kemudian terjadi *ovalized* kembali namun tanpa mengalami peningkatan gaya geser. Kemudian ketika pembebanan diberikan kembali pada *link*, baut akan mengalami *slip* kembali. Hal tersebut yang menyebabkan munculnya efek *pinching* pada kurva *hysteresis*nya. Tegangan tertinggi pada baut baris pertama, sedangkan tegangan terkecil ada di baut bagian tengah.

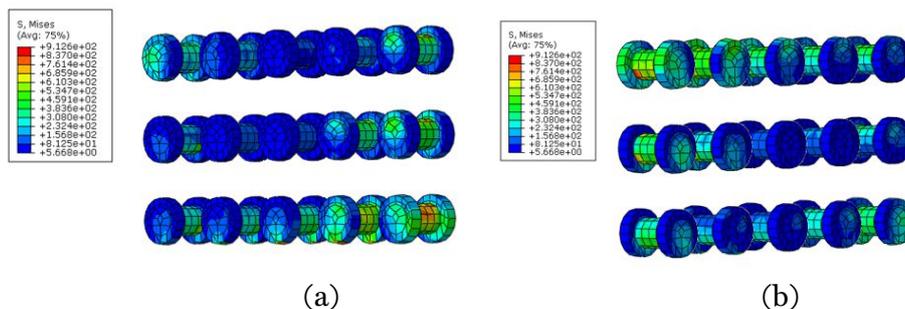
Pada baut, baut baris pertama *link* mengalami tegangan paling besar dibanding dengan bagian lainnya seperti yang terilustrasi pada **Gambar 6**. Baut pada daerah tersebut mengalami kontak tarik menarik langsung dengan balok *link* dalam pembebanan. Baut daerah tersebut jugalah yang memiliki daerah lubang baut dengan *ovalized* terbesar. Sedangkan baut pada bagian tengah memiliki nilai tegangan yang paling kecil. Bagian tersebut berkerja sebagai pengikat pada profil C ke balok induk dan tidak mengalami kontak tarik yang besar seperti elemen baut lainnya dan sebagian besar baut tersebut hanya mengalami sedikit putaran pada porosnya akibat pembebanan. Untuk mengantisipasi gagalnya spesimen *web bolted link* pada daerah sambungan, dapat diberikan pengembangan *link* berupa penambahan plat pengaku pada bagian sambungan baut. Plat persegi dapat ditambahkan pada bagian sambungan dengan ketebalan tertentu untuk mencegah kegagalan di awal pembebanan. Penambahan tersebut juga diasumsikan dapat mengurangi efek *pinching*; serta pelelehan dapat terjadi lebih terfokus di bagian *web link*.



Gambar 4. Perilaku replaceable *link* pasca dibebani siklik hingga siklus ke-52



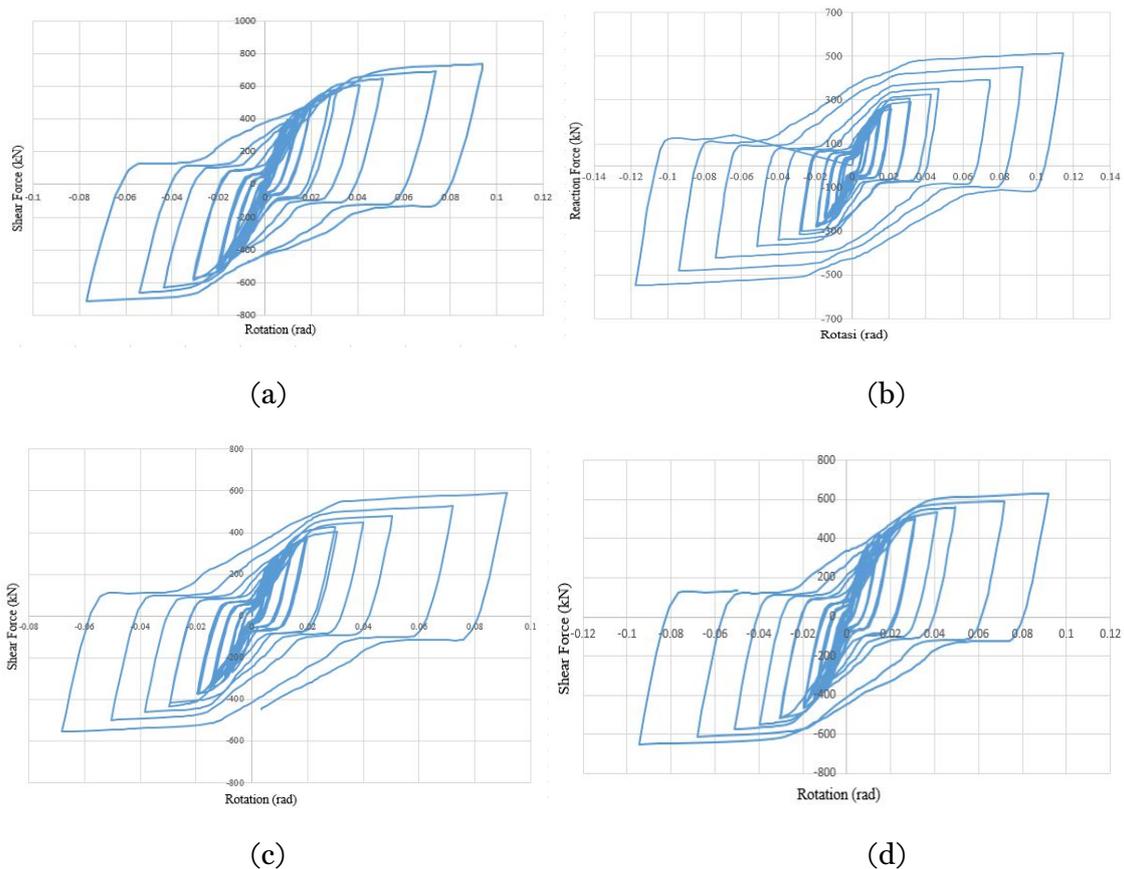
Gambar 5. Perilaku tegangan pada bagian baut akibat pembebanan siklik



Gambar 6. Tegangan yang dihasilkan pada bagian sambungan (a) kanan, (b) kiri.

3.2. Perilaku Siklik

Respon siklik yang dihasilkan spesimen didapatkan dengan meletakkan gaya geser (V) dengan deformasi plastis (γ_p) pada grafik x dan y . Respon *hysteresis* dari seluruh spesimen dapat dilihat pada **Gambar 6**. Pada kurva *hysteresis* yang dihasilkan seluruh spesimen, dapat dilihat bahwa seluruh *link* mampu mencapai kondisi plastisnya. Namun, dari grafik juga ditunjukkan bahwa efek *pinching* terjadi di seluruh spesimen. Efek *pinching* tersebut dihasilkan dari naiknya jarak *slip* serta terbentuknya lebih besar rotasi pada sambungan. Deformasi yang terjadi pada lubang baut (*ovalized*) juga sebagai salah satu terbentuknya *pinching* pada kurva *hysteresis*.



Gambar 7. Kurva hysteresis akibat pembebanan pada spesimen a) L-BJ41, b) L-LYS100, c) L-LYS160, dan d) L-LYS225

Pada L-LYS100 dapat diamati kurva *hysteresis* hasil pemodelan numerik menunjukkan bahwa spesimen mampu melampaui batas elastis dengan menghasilkan kurva bilinear pada saat pembebanan siklus kedua. Sedangkan pada L-LYS225 bentuk kurva hysteresis serupa dengan spesimen L-BJ41. Nilai energi disipasi didapatkan dari luasan area pada grafik gaya geser yang dihasilkan dengan rotasi pada kurva *hysteresis* yang dihasilkan dari pembebanan siklik pada masing-masing spesimen dengan Abaqus. Perbandingan energi disipasi yang dihasilkan dapat dilihat pada **Tabel 4**. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa seluruh spesimen uji mampu mendisipasi gaya geser dengan baik, namun L-LYS100 memiliki kemampuan disipasi energi yang paling besar dibandingkan dengan spesimen uji lainnya yaitu sebesar 101277.13 kNmm. Sedangkan L-BJ41 dan L-LYS225 nilai disipasi energinya hampir serupa yaitu 87085.04 kNmm dan 89488.67 kNmm.

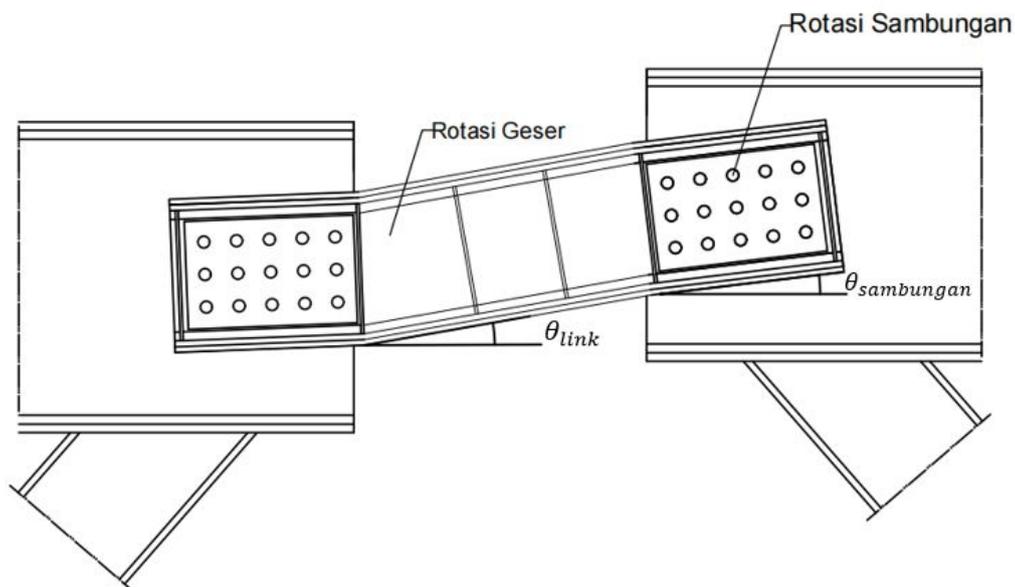
Kemampuan *link* dalam mendisipasi energi juga dapat dianalisa dari kurva *hysteresis*nya. Kurva *hysteresis* yang cenderung lebar dapat diklasifikasikan bahwa spesimen yang dimodelkan mampu mendisipasi energi dengan baik dan juga stabil. Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 7**, seluruh spesimen menunjukkan hasil kurva yang cenderung lebar dan berisi dimana hal tersebut menunjukkan kemampuan disipasi yang baik dan stabil pada seluruh hasil pemodelan.

Tabel 3. Energi Disipasi Pemodelan

No	Spesimen	Energi Disipasi (kNmm)
1	L-BJ41	87085.04
2	L-LYS100	101277.13
3	L-LSY160	71189.71
4	L-LYS225	89488.67

3.3. Kapasitas Deformasi dan Daktilitas

Kapasitas deformasi pada *link* dapat dianalisa melalui rotasi yang dihasilkan oleh *link*. Rotasi tersebut diperoleh dari batasan displacement yang diberikan pada saat pemberian beban pada program ABAQUS. Pada *link* tipe *web bolted*, nilai rotasi *link* sedikit berbeda jika dibandingkan dengan nilai rotasi pada *link* konvensional. Pada *web bolted link*, nilai rotasi merupakan penjumlahan antara rotasi geser pada *link* dan rotasi yang terjadi pada sambungan seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 8** (Mansour et al., 2011). Rotasi yang dihasilkan oleh seluruh elemen *link* ditabelkan pada **Tabel 4**.



Gambar 8. Rotasi pada web bolted *link*

Pada *link web bolted*, *link* mengalami kenaikan rotasi inelastic pada bagian sambungan. *Web bolted link* mampu mencapai rotasi *link* yang besar sehingga dapat dikatakan bahwa *link web bolted* memiliki sifat yang lebih fleksibel dibandingkan dengan *link* konvensional pada umumnya. Pada klasifikasinya, *link* geser harus mampu memenuhi persyaratan rotasi minimal sebesar 0.08 rad, sedangkan untuk *link* panjang, dimana *link* panjang merupakan *link* yang cenderung menerima gaya lentur, rotasi yang dapat diterima harus mampu mencapai nilai 0.02 rad seperti pada **Tabel 5** (Suswanto et al., 2017).

Tabel 4. Rotasi pada Replaceable *Link*

Spesimen	Shear rotation	Connection Rotation	Rotation (γ)
	(γ_{shear})	(γ_{conn})	
	rad	rad	rad
L-BJ41	0.0940	0.004	0.098
L-LYS100	0.0976	0.005	0.103
L-LYS160	0.0915	0.003	0.095
L-LYS225	0.0920	0.005	0.097

Tabel 5. Klasifikasi Rotasi pada *Link* (Suswanto et al., 2017)

No	Panjang <i>Link</i>	Tipe <i>Link</i>	Rotasi (rad)
1	$1.6M_p/V_p$	Geser penuh	0.08
2	$1.6 M_p/V_p \leq e \leq 2.6M_p/V_p$	Dominan geser	< 0.02
3	$2.6 M_p/V_p \leq e \leq 5M_p/V_p$	Dominan lentur	0.02
4	$e \geq 5M_p/V_p$	Full lentur	

Pada klasifikasi *link* geser, nilai rotasi yang dihasilkan oleh *link* harus mampu memenuhi persyaratan yaitu rotasi harus mencapai minimal 0.08 rad (Suswanto et al., 2017). Dari hasil pemodelan, didapatkan hasil bahwa *link* secara keseluruhan mampu mengalami rotasi diatas 0.08 rad pada saat pembebanan siklus ke 52. Dari hasil pemodelan dapat dilihat bahwa *link* yang tersusun dari material LYS100 memiliki nilai rotasi paling besar yaitu sebesar 0.103 rad seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 4** *Link* LYS100 mampu memiliki nilai rotasi yang besar dikarenakan material dari LYS100 sendiri memiliki regangan yang besar. Sedangkan untuk *link* dengan material lainnya secara keseluruhan mampu memenuhi persyaratan rotasi diatas 0.08 rad. Dalam pelaksanaan konstruksi, kontraktor dapat memilih untuk mendesain strukturnya untuk mampu bergerak secara lebih fleksibel ketika dikenai gempa atau berperilaku *rigid* dan mampu mendisipasi energi dengan lebih baik. Apabila kebutuhan struktur adalah fleksibilitas, maka pemilihan struktur EBF dengan *web bolted link* dapat dijadikan referensi dalam melakukan desain struktur.

Daktilitas pada *link* dapat dicari dengan mengaplikasikan formula Δ_f/Δ_y dengan Δ_f adalah perpindahan pada saat terjadi kegagalan sedangkan Δ_y adalah perpindahan pada saat kondisi leleh tercapai (Tawfik et al., 2014). Pada hasil pemodelan, daktilitas yang dihasilkan dituliskan pada **Tabel 6**. Pada suatu struktur maupun elemen uji, perilaku daktail spesimen lebih disukai dibandingkan dengan perilaku elemen yang kaku karena daktilitas yang besar menunjukkan bahwa struktur maupun elemen mampu mengatasi deformasi yang besar tanpa kehilangan kekuatannya (Tawfik et al., 2014). Dari perhitungan pada **Tabel 6**, spesimen L-LYS100 memiliki nilai daktilitas yang paling besar dibandingkan dengan ketiga spesimen lainnya. Sedangkan L-LYS225 dan L-BJ41 memiliki nilai daktilitas yang hampir serupa yaitu 4.12.

Tabel 6. Daktilitas Spesimen

No	Spesimen	Δ_y (mm)	Δ_f (mm)	Daktilitas
1	L-BJ41	5.18	21.32	4.12
2	L-LYS100	7.7	42.63	5.54
3	L-LSY160	5.28	22.87	4.33
4	L-LYS225	4.75	24.42	5.14

Dari hasil pemodelan yang didapatkan, regangan memiliki pengaruh pada nilai daktilitas yang dihasilkan. L-LYS100 yang memiliki regangan terbesar menghasilkan daktilitas yang terbesar pula. Sedangkan spesimen L-LYS225 yang tersusun dari material *low yield point steel* dimana

nilai regangan serta tegangannya hampir serupa dengan L-BJ41 menunjukkan perilaku daktail yang serupa.

3.4. Pengaruh Material terhadap Perilaku Siklik

Link dengan LYS mampu menunjukkan deformasi plastis yang besar. Material dengan LYS juga khususnya LYS100 memiliki perilaku siklik yang baik meskipun LYS100 hanya memiliki nilai tegangan leleh yang paling kecil dibandingkan dengan lainnya ($f_y = 97,58 \text{ MPa}$). Elemen LYS100 memiliki daktilitas paling baik dan nilai rotasi yang lebih besar. Sedangkan penggunaan material LYS225 dan BJ-41 tidak menunjukkan banyak perbedaan sehingga dalam pengaplikasian akan lebih efisien menggunakan BJ41 dibanding LYS225 mengingat BJ41 lebih mudah ditemukan serta lebih banyak digunakan dalam pembangunan suatu struktur.

3.5. Perbandingan dengan *Link* Sebelumnya

Metode untuk mendesain elemen *replaceable link* telah banyak dikembangkan akhir-akhir ini. Para peneliti banyak mengembangkan *replaceable link* yang diharapkan mampu mendisipasi gaya gempa dengan lebih baik dan stabil. Studi sebelumnya memodelkan elemen *replaceable link* dengan memanfaatkan material baja konvensional yang sering dipakai dalam pembangunan struktural. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *replaceable link* konvensional, khususnya *web bolted link* mampu memenuhi persyaratan dalam mendisipasi energi gempa, khususnya dalam hal rotasi. *Web bolted link* memiliki sifat yang lebih fleksibel karena dapat berotasi dengan nilai sudut yang tinggi melampaui persyaratan 0.08 rad (Mansour et al., 2011).

Sedangkan untuk hasil pengujian, *link* dengan material baja ringan *low yield steel* juga mampu memenuhi persyaratan terkait kemampuan dalam mendisipasi gempa. Material LYS, khususnya LYS100 yang memiliki nilai tegangan leleh lebih rendah ($f_y = 97.58$) mampu menghasilkan kemampuan disipasi energi yang besar, bahkan melampaui *link* dengan baja konvensional BJ41.

Pada penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa material baja dengan f_y 100 MPa perlu diberikan perilaku khusus agar kemampuan disipasi energinya meningkat dan tidak terjadi robekan pada web (Dusicka et al., 2010). Pada penelitian ini, *link* LYS diberikan pengaku pada bagian web untuk menghindari terjadinya robekan. Hasil menunjukkan bahwa penambahan stiffener memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kestabilan *link* dalam menerima beban gempa. *Link* mampu menerima beban tanpa terjadinya sobekan web di awal pembebanan.

4. KESIMPULAN

Keempat elemen *replaceable link* dengan berbagai jenis material dimodelkan dan dilakukan pengujian untuk kemudian dianalisa kinerjanya akibat pemberian beban siklik. Material yang digunakan dalam pengujian meliputi dua jenis material, yaitu baja tipe konvensional BJ41 serta baja *low yield point* LYS100, LYS160, dan LYS225.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa keempat elemen *replaceable link* yang dimodelkan memiliki daktilitas yang baik. Spesimen uji tersebut masing-masing mampu mendisipasi energi geser dengan stabil serta menghasilkan rotasi yang melampaui persyaratan yaitu mampu melampaui rotasi 0.08 rad untuk tipe balok *link* geser.

Replaceable link dengan material LYS100 dimana memiliki nilai regangan paling besar memiliki nilai rotasi, disipasi, serta daktilitas yang paling besar, walaupun material tersebut

memiliki tegangan leleh yang hanya sekitar 100 MPa. Disamping itu, *replaceable link* dengan material LYS225 perilaku dalam menerima beban gempa sebanding dengan *link* dengan baja konvensional BJ41, sehingga material BJ41 akan lebih efisien ketika digunakan karena lebih banyak ditemui di pasaran.

Hasil pemodelan juga menunjukkan pola kegagalan/keruntuhan yang terjadi pada balok *link*. Pola kegagalan akibat pembebanan terjadi pada bagian sambungan, dimana sambungan memiliki nilai tegangan yang paling besar. Efek *ovalized* juga diamati terjadi pada bagian sambungan yang disebabkan oleh *slip* baut akibat pembebanan. Sedangkan untuk meningkatkan kapasitas balok link, pemberian *web stiffener* pada *link*, khususnya LYS, diketahui mampu menghasilkan *link* LYS yang lebih stabil.

Untuk penelitian selanjutnya perlu dilakukan penelitian eksperimental tentang perilaku *link* LYS serta pengaruhnya pada suatu struktur portal EBF. Selain itu, perilaku *web bolted replaceable link* dengan penambahan plat pengaku pada bagian sambungan serta bagian *flanges* juga perlu dilakukan analisa studi lebih lanjut terkait pemaksimalan pelelehan pada bagian web. Diharapkan dengan adanya penambahan plat pengaku tersebut, *link* menjadi lebih kuat serta kapasitas disipasi energinya dapat diperbesar.

DAFTAR PUSTAKA

- Bozkurt, Mehmet Bakir, & Topkaya, C. (2017). Replaceable Links with Direct Brace Attachments for Eccentrically Braced Frames. *Earthquake Engineering Structure Dynamics*, 056, 1–6. <https://doi.org/10.1002/eqe>
- Bozkurt, Mehmet Bakir, Kazemzadeh Azad, S., & Topkaya, C. (2019). Development of detachable replaceable links for eccentrically braced frames. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 48(10), 1134–1155. <https://doi.org/10.1002/eqe.3181>
- Bozkurt, Mehmet Bakir, & Topkaya, C. (2018). Replaceable links with gusseted brace joints for eccentrically braced frames. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115(August), 305–318. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.08.035>
- Dubina, D., Stratan, A., & Dinu, F. (2008). Dual high-strength steel eccentrically braced frames with removable links. *Earthquake Engineering Structure Dynamics*, 1–6. <https://doi.org/10.1002/eqe>
- Dusicka, P., Itani, A. M., & Buckle, I. G. (2010). Cyclic behavior of shear links of various grades of plate steel. *Journal of Structural Engineering*, 136(4), 370–378. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000131](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000131)
- Gooch, J. W. (2011). Coefficient of Friction. In *Encyclopedic Dictionary of Polymers* (pp. 151–151). https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6247-8_2533
- Ji, X., Wang, Y., Ma, Q., & Okazaki, T. (2017). Cyclic Behavior of Replaceable Steel Coupling Beams. *Journal of Structural Engineering (United States)*, 143(2), 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001661](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001661)
- Lian, M., & Su, M. (2017). Experimental study and simplified analysis of EBF fabricated with high strength steel. *Journal of Constructional Steel Research*, 139, 6–17. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.09.013>
- Mahmoudi, F., Dolatshahi, K. M., Mahsuli, M., Nikoukalam, M. T., & Shahmohammadi, A. (2019). Experimental study of steel moment resisting frames with shear link. *Journal of Constructional Steel Research*, 154, 197–208. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.11.027>
- Mansour, N., Christopoulos, C., & Tremblay, R. (2011). Experimental validation of replaceable shear links for eccentrically braced steel frames. *Journal of Structural Engineering*, 137(10), 1141–1152. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000350](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000350)
- Özkılıç, Y. O., & Topkaya, C. (2021). Extended end-plate connections for replaceable shear links. *Engineering Structures*, 240(April). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112385>
- Park, K. S., Price, B., Jiansinlapadamrong, C., & Chao, S. H. (2021). Seismic behavior of double-HSS links for eccentrically braced frames. *Engineering Structures*, 239(April), 112297. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112297>

- Richards, P. W., & Uang, C. (2005). *Effect of Flange Width-Thickness Ratio on Eccentrically Braced Frames Link Cyclic Rotation Capacity*. *October*, 1546–1552.
- Suswanto, B., Rizki, A., Wahyuni, E., & Wilson, J. (2017). *Numerical Behavior Study of Short Link , Intermediate Link and Long Link in Eccentrically Braced Frame Steel Structure*. *12*(21), 11460–11471.
- Tan, K. G., & Christopoulos, C. (2016). Development of Replaceable Cast Steel Links for Eccentrically Braced Frames. *Journal of Structural Engineering (United States)*, *142*(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001550](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001550)
- Tawfik, A. S., Badr, M. R., & ElZanaty, A. (2014). Behavior and ductility of high strength reinforced concrete frames. *HBRC Journal*, *10*(2), 215–221. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2013.11.005>
- Tong, L., Zhang, Y., Zhang, L., Liu, H., Zhang, Z., & Li, R. (2018). Ductility and energy dissipation behavior of G20Mn5QT cast steel shear link beams under cyclic loading. *Journal of Constructional Steel Research*, *149*, 64–77. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.07.009>
- Yin, Z., Feng, D., & Yang, W. (2019). Damage analyses of replaceable links in eccentrically braced frame (EBF) subject to cyclic loading. *Applied Sciences (Switzerland)*, *9*(2), 1–20. <https://doi.org/10.3390/app9020332>
- Zhang, C., Zhu, J., Wu, M., Yu, J., & Zhao, J. (2016). The lightweight design of a seismic low-yield-strength steel shear panel damper. *Materials*, *9*(6). <https://doi.org/10.3390/ma9060424>
- Zhang, H., Su, M., Lian, M., Cheng, Q., Guan, B., & Gong, H. (2020). Experimental and numerical study on the seismic behavior of high-strength steel framed-tube structures with end-plate-connected replaceable shear links. *Engineering Structures*, *223*(June), 111172. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111172>