

Analisis Indeks Kegagalan Link Panjang Standar dan Modifikasi pada Struktur EBF

Musbar^{1*}, Khairul Miswar², Hanif³, Zulfikar⁴

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Lhokseumawe

*Koresponden email: musbaribrahim@pnl.ac.id

Diterima: 13 Februari 2024

Disetujui: 28 Maret 2024

Abstract

The rapid failure of long links in EBF structures occurs at the ends of the links due to the influence of the dominant moment. The use of long links is still very relevant due to the large space openings and meeting the AISC 341 requirements is very easy compared to other links. One of the efforts made to overcome this weakness is to increase the stiffness at the ends of the standard long links. The design of the perforated plate aims to reduce the influence of residual stresses due to wider welds and to control the critical variables. The control arm with the confirmation holes is called the modified control arm. The numerical test variables for the modified long link specimens were the plate thickness (t_s) and the vertical distance from the flanges to the edge of the hole in the stiffener plate (T_h). The research was carried out numerically to determine the criteria for the initiation of ductile fracture based on the performance indicators of the test specimens using the comparison of failure index and PEEQ index values. The results showed that the initiation of fracture in the flanges at the ends of the beam can be delayed by the addition of double-edged stiffener plates, this can be seen from the decrease in MRI and PEEQ index values in the critical zone of the modified long beam test specimen compared to the standard long beam.

Keywords: *modified link, failure index, PEEQ index*

Abstrak

Kegagalan yang cepat pada link panjang pada struktur EBF yang terjadi di ujung – ujung link akibat pengaruh momen yang dominan. Penggunaan link panjang masih sangat relevan disebabkan bukaan ruang yang luas dan pencapaian persyaratan sesuai dengan peraturan AISC 341 sangat mudah dicapai dibandingkan dengan link lainnya. Salah satu upaya yang dilakukan untuk mengatasi kelemahan tersebut adalah menambah kekakuan pada bagian ujung – ujung link panjang standar. Konfigurasi pelat tambahan pemberian lubang – lubang bertujuan untuk mengurangi pengaruh tegangan sisa akibat pengelasan yang lebih luas dan mengontrol variabel yang menentukan. Link panjang dengan penambahan pelat tambahan dengan konfirmasi lubang – lubang dinamakan dengan link panjang modifikasi. Variabel pengujian secara numerik pada benda uji link panjang modifikasi adalah ketebalan pelat (t_s) dan jarak vertikal pelat sayap ke tepi lubang pada pelat pengaku (T_h). Penelitian dilakukan secara numerik untuk melihat kriteria inisiasi fraktur daktil berdasarkan indikator kinerja dari spesimen uji menggunakan perbandingan nilai *failure index* dan *PEEQ index*. Hasil penelitian diperoleh bahwa inisiasi terjadinya fraktur pada pelat sayap di ujung – ujung link dapat diperlambat dengan penambahan pelat pengaku tepi ganda, hal ini dapat dilihat berdasarkan penurunan nilai MRI dan *PEEQ index* pada zona kritis pada spesimen uji link panjang modifikasi terhadap link panjang standar.

Kata Kunci: *link modifikasi, failure index, PEEQ index*

1. Pendahuluan

Struktur rangka eksentris (EBF) adalah jenis struktur rangka baja yang mampu mendisipasi energi gempa melalui elemen yang disebut link. Elemen link mampu menyerap energi gempa secara optimal melalui perilaku geser, lentur, dan kombinasi keduanya. Pada saat perencanaan, elemen link dapat mengalami kerusakan akibat penyerapan gaya gempa, sedangkan elemen struktur lain di luar link tidak mengalami kerusakan. Struktur EBF memiliki keunggulan dalam hal elastisitas dan daktilitas yang tinggi. Struktur ini digunakan pada berbagai macam struktur rangka baja. Berdasarkan ukuran panjangnya, elemen link dibagi menjadi tiga jenis, yaitu: link pendek, menengah, dan panjang. Berdasarkan perbandingan kinerja ketiga jenis link tersebut menunjukkan bahwa link pendek berkinerja lebih baik daripada link lainnya. Studi mengenai struktur EBF dikembangkan oleh Popov, dkk pada tahun 1970-1980 dan terus berkembang hingga saat ini dengan objek penelitian yang sangat luas. Analisis perilaku, kinerja, dan perencanaan struktur umum EBF dirangkum secara rinci. Tautan panjang tidak berkinerja sebaik tautan

pendek dan menengah. Kinerja yang lebih rendah disebabkan oleh tekuk dan patah yang cepat pada kedua ujung link. Terdapat perbedaan yang signifikan antara perilaku link pendek dan panjang. Studi eksperimental awal oleh Hjelmstad dan Popov [1], [2] menunjukkan bahwa link pendek memiliki kekuatan dan daktilitas yang jauh lebih tinggi di bawah pembebanan siklik yang berat. Berbagai panjang batas praktis untuk perilaku yang didominasi geser telah diusulkan oleh Popov dan koleganya selama bertahun-tahun. Pada akhirnya, kesimpulan yang diambil adalah batas $\rho < 1,6$. Nilai batas ini masih digunakan dalam beberapa spesifikasi desain EBF dan juga telah diadopsi oleh AISC 341 [3]. Sejauh ini, link panjang masih banyak digunakan dalam sistem EBF. Hal ini didasarkan pada kebutuhan dari sudut pandang arsitektur untuk area yang lebih luas di area penempatan link.

Salah satu cara untuk meningkatkan kinerja link panjang adalah dengan meningkatkan kekakuan zona kritis di ujung link. Perubahan yang mudah dilakukan adalah dengan menambahkan kekakuan tambahan pada ujung-ujung link yang panjang. Terdapat berbagai konfigurasi untuk sistem EBF, konfigurasi yang paling umum adalah split K-braced dan D-braced. Kedua konfigurasi tersebut memiliki keuntungan menggunakan area yang lebih fleksibel di dalam area link. Di antara berbagai konfigurasi EBF, penelitian ini menggunakan konfigurasi split K-braced. Pada sistem EBF, leleh hanya terjadi pada elemen link dan semua elemen rangka lainnya secara proporsional dalam kondisi elastis. Leleh yang terjadi pada link memiliki posisi yang berbeda-beda, hal ini sangat tergantung pada panjang link. Richards [4] dalam penelitiannya menunjukkan bahwa tidak ada hubungan yang signifikan antara rasio lebar - tebal flens dengan rotasi kapasitas link. Beberapa spesimen dengan link pendek, menengah, dan panjang dengan flensa ramping dapat melakukan rotasi desain.

Selama ini, beberapa spesimen link menengah yang memenuhi rasio lebar-ketebalan pelat sayap yang disyaratkan tidak mencapai rotasi desain. Sebuah tinjauan perjalanan dari awal hingga yang terbaru dalam penelitian EBF, ditulis oleh Azad [5]. Leleh pada link panjang terjadi pada flens dan web yang terkonsentrasi pada ujung link. Sementara itu, hasil pada link pendek terjadi pada web dan flens di sepanjang link. Luluh yang terjadi dengan cepat pada link panjang dapat diatasi dengan menambah kekakuan pada ujung - ujung link. Penelitian yang dilaporkan sampai saat ini telah difokuskan pada studi perilaku inelastis dari sistem dan pengembangan rekomendasi untuk meningkatkan kinerja seismik dari link yang panjang [6]–[9]. Penelitian terbaru telah melaporkan perilaku inelastis, kinerja, dan rekomendasi tentang kemampuan seismik link EBF [10]–[15].

2. Metode Penelitian

A. Spesimen Uji

Profil baja yang digunakan untuk analisis numerik pada penelitian ini adalah WF 200.100.5,5.8, profil ini telah memenuhi persyaratan kelangsingan berdasarkan AISC 341. Profil WF (*wide flange*) secara umum lebih banyak digunakan pada sistem struktur rangka baja berpengaku eksentrik. Rasio panjang link (ρ) yang dianalisis adalah 3,03 dengan panjang link (e) sebesar 1000 mm, hal ini telah sesuai dengan persyaratan AISC 341 untuk link dominan lentur. Penelitian dilakukan secara numerik dengan parameter kinerja yang ingin dicapai pada pengujian link panjang dengan melakukan modifikasi penambahan pengaku tepi ganda pada kedua sisi di ujung link adalah kekuatan, daktilitas, kekakuan dan disipasi energi.

Fenomena yang lain yang ingin ditangkap adalah perilaku parameter pada pelat pengaku tepi ganda tambahan yaitu berupa ketebalan pelat dan variasi lebar lubang untuk mengatur zona plastifikasi yang terjadi pada link panjang. Variabel yang menjadi sasaran pengujian secara numerik pada benda uji link panjang modifikasi adalah ketebalan pelat (t_s) dan jarak vertikal pelat sayap ke tepi lubang pada pelat pengaku (T_h), lebar lubang arah longitudinal sumbu link (B_h) dan jarak pelat pengaku terhadap sisi terluar pelat sayap (J_s). Variabel ini menjadikan konsep kegagalan dan zona plastifikasi pada link panjang modifikasi akan dapat berbeda satu sama lainnya.

Perbedaan ini akan terlihat pada pola dan zona kegagalan, secara umum kegagalan pada link panjang lebih dominan disebabkan fraktur dan tekuk pada sayap di ujung - ujung link. Dengan penggunaan pelat pengaku tepi ganda tambahan pola kegagalan akibat fraktur dapat diminimalisasi dan diperlambat dengan mengarahkan kegagalan akibat momen lentur maksimum yang terkonsentrasi pada ujung - ujung link lebih terdorong ke arah dalam link [9].

Konfigurasi lubang yang diberikan pada pelat pengaku tepi ganda tambahan seperti diperlihatkan pada **Gambar 1**. Parameter yang ditetapkan untuk dianalisis pada benda uji link panjang modifikasi dengan penambahan pelat tepi pengaku ganda adalah ketebalan, jarak vertikal pelat sayap ke tepi lubang pada pelat pengaku dan longitudinal dan jarak pelat tepi. Perbandingan nilai modulus penampang plastis (Z_p) link panjang modifikasi seperti diperlihatkan pada **Tabel 1**. Peningkatan nilai modulus penampang pada benda uji link panjang modifikasi dipengaruhi oleh dua variabel utama yaitu ketebalan dan jarak vertikal pelat

sayap ke tepi lubang pada pelat pengaku. Variabel yang dikaji terhadap kinerja link panjang modifikasi dengan penambahan pelat pengaku tepi ganda maka susunan benda uji yang dianalisis secara numerik ditunjukkan pada **Tabel 2**.

Benda uji link panjang berdasarkan ukuran panjang link menurut ketentuan spesifikasi AISC 341 [3] untuk pengaku penuh pada kedua sisi badan link pada *bracing* diagonal pada ujung-ujung link, lebar pengaku tidak boleh kurang dari $(b_f - 2t_w)$ dan dengan ketebalan tidak boleh kurang dari $0,75t_w$ atau 10 mm dan jarak spasi pengaku vertikal maksimum adalah $1,5b_f$. Penelitian ini menggunakan pelat pengaku vertikal dengan ketebalan 10 mm dan spasi jarak pengaku vertikal 150 mm. Untuk mencegah dan memperlambat terjadinya fraktur pada badan link, maka zona K-area dihentikan pada jarak $4 - 5t_w$ yang diambil sebesar 20 mm. Batasan nilai untuk pengaku tepi berdasarkan persamaan (1) sebagai berikut:

$$r = \frac{1}{2} B_h; 0,1H \leq t_h \leq 0,25H; 0,2b_f \leq B_h \leq 0,5b_f \quad (1)$$

Kapasitas modulus penampang plastis (Z_p) link standar dan modifikasi dihitung berdasarkan persamaan (2) dan (3), sebagai berikut:

$$Z_p = \left\{ (b \cdot t_f)(H - t_f) \right\} + \left\{ \frac{1}{4} \cdot t_w \cdot (H - 2t_f)^2 \right\} \quad (2)$$

$$Z_p = \left\{ (b \cdot t_f)(H - t_f) \right\} + \left\{ \frac{1}{4} \cdot t_w \cdot (H - 2t_f)^2 \right\} + \left\{ 2T_h \cdot t_s (H - (T_h + 2t_f)) \right\} \quad (3)$$

Tabel 1. Modulus Penampang Plastis Spesimen uji

Spesimen Uji	Variabel				Modulus penampang		Momen Inersia
	(t_s) (mm)	(T_h) (mm)	(B_h) (mm)	(J_s) (mm)	(Z_p) (mm ³)	Rasio (%)	I_x (mm ⁴)
Standar	-	-	-	-	200152	0,00%	14769650,67
MPVT01	4	30	40	10	237112	18,47%	17651570,67
MPVT02	6	30	40	10	255592	27,70%	19092530,67
MPVT03	8	30	40	10	274072	36,93%	20533490,67
MPVT04	10	30	40	10	292552	46,16%	21974450,67
MPVL01	8	20	40	10	252632	26,22%	19094344,00
MPVL02	8	30	40	10	274072	36,93%	20533490,67
MPVL03	8	40	40	10	292312	46,05%	21575837,33
MPVL04	8	50	40	10	307352	53,56%	22285384,00
MPVL05	10	50	40	10	334152	66,95%	24164317,33

Sumber: Penulis

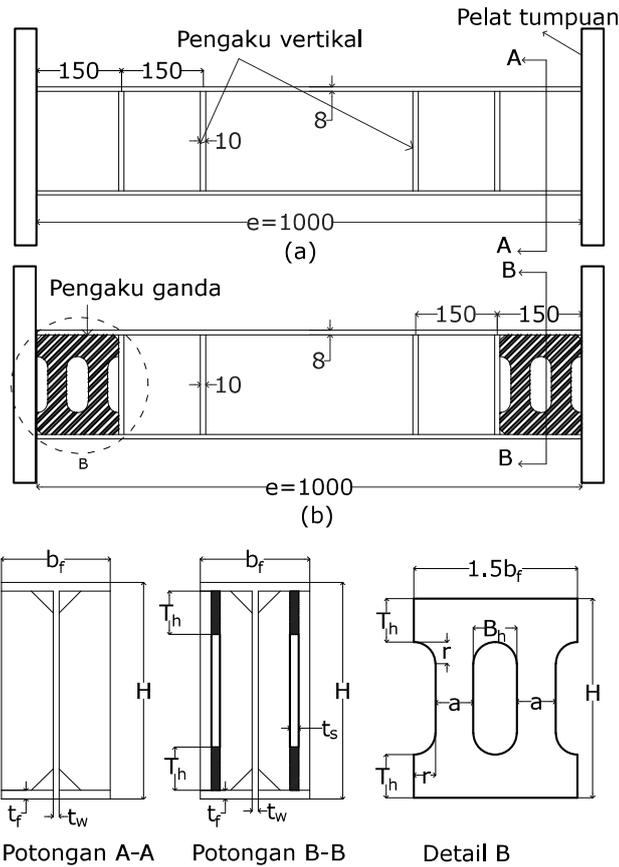
Tabel 2. Variasi Spesifikasi Model Benda Uji

Spesimen	Variabel	Model	Spesifikasi	Keterangan
Standar	Tipe elemen	Standar 01	<i>Linear</i>	Jumlah elemen sama
		Standar 02	<i>Quadratic</i>	
MPVT	t_s (mm)	MPVT01	4	Variabel T_h , B_h dan J_s sama (30, 40 dan 10 mm)
		MPVT02	6	
		MPVT03	8	
		MPVT04	10	
MPVL	T_h (mm)	MPVL01	20	Variabel t_s , J_s dan B_h sama (8, 10 dan 40 mm)
		MPVL02	30	
		MPVL03	40	
		MPVL04	50	

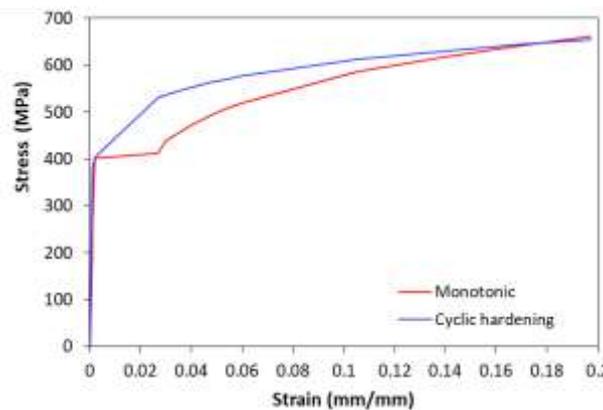
Sumber: Penulis

Selain parameter bentuk geometris yang dianalisis terhadap link panjang modifikasi, parameter lainnya adalah data teknis material baja dan ukuran *mesh*. Data teknis material yang dikaji adalah data hasil

uji tarik material baja yang dianalisis dengan menggunakan model pendekatan Kaufmann, dkk. Masing – masing benda uji yang dianalisis secara numerik dilakukan kajian untuk kedua model matematis hasil uji tarik baja. Ukuran *mesh* yang digunakan juga menjadi variabel yang penting untuk melihat keakuratan pencapaian nilai regangan maksimum sebagai kontrol terhadap akurasi perhitungan hasil kajian numerik.



Gambar 1. Benda uji (a) link panjang standar dan (b) link panjang Modifikasi
 Sumber: Penulis



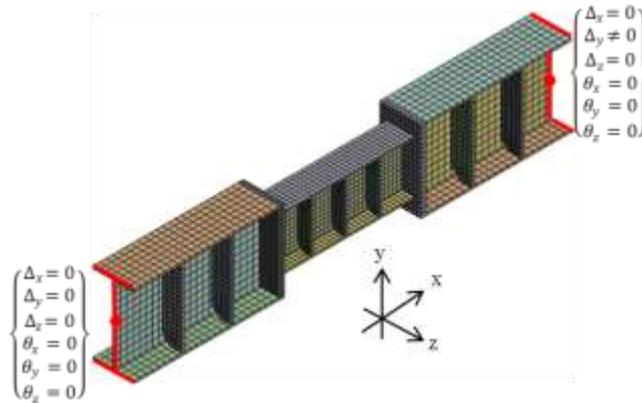
Gambar 2. Model Matematis Kurva Tegangan – Regangan Baja Menggunakan Pendekatan Kaufmann, dkk
 Sumber: Penulis

Penelitian ini dilakukan secara numerik dengan menggunakan metode elemen hingga non-linear. Struktur dimodelkan sebagai elemen shell dan Solid dengan menggunakan perangkat lunak komputer ANSYS 2023 R1. Perilaku model link diprediksi secara global dan degradasi kekuatan diperoleh pada saat terjadi tekuk pada sayap, badan dan pengaku pada link. Degradasi kekuatan terkait dengan fraktur atau robeknya material yang melewati cakupan batas dalam penelitian ini. Non linearitas geometri mempertimbangkan deformasi dan regangan besar yang terjadi pada analisis model. Kriteria leleh menggunakan von Mises Criterion dengan hardening rule yaitu multilinear kinematic. Perilaku model link diprediksi secara global dan degradasi kekuatan didapati pada saat terjadi tekuk (buckling) pada sayap, badan dan pengaku pada link dengan kontrol pada nilai regangan kritis. Data properties

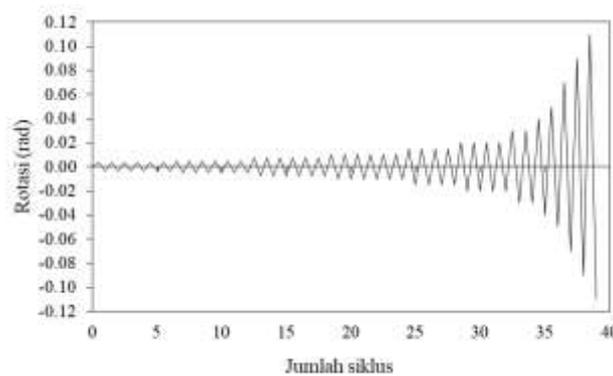
material yang menjadi input pada analisis numerik menggunakan data material baja hasil uji tarik hasil penelitian dari Musbar, dkk [10].

B. Kondisi Batas dan Pola Pembebanan

Pemilihan kondisi batas dan pembebanan yang tepat akan merefleksikan secara nyata kondisi struktur dalam komponen tersebut. Beberapa peneliti menggunakan kondisi batas dengan salah satu ujung dari link dikekang terhadap derajat kebebasan dalam arah translasi dan rotasi pada semua arah [16]–[19]. Ujung yang lainnya dapat bertranslasi pada arah gaya dan dalam arah sejajar sumbu link, sedangkan derajat kebebasan lainnya dikekang sebagaimana diperlihatkan pada **Gambar 2**. Model kondisi batas yang digunakan dapat menghilangkan pengaruh gaya aksial.



Gambar 2. Kondisi Batas Analisis Numerik Spesimen Uji

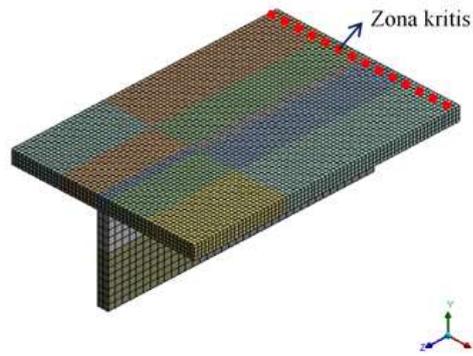


Gambar 3. Pola Pembebanan

Pola pembebanan yang diberikan pada spesimen uji sesuai dengan urutan pembebanan yang ditentukan dalam ketentuan AISC 341. Gaya yang diberikan pada spesimen ditentukan oleh sudut rotasi keseluruhan link. Pembebanan selanjutnya dapat dilakukan dengan penambahan 0,02 radian dengan satu siklus pembebanan pada setiap tahapan. Beban diberikan sebagai perpindahan yang diaplikasikan pada salah satu ujung spesimen uji. Untuk mendapatkan respons yang akurat terhadap perilaku plastis dalam penelitian ini, peningkatan inkremental digunakan dalam rentang 25 langkah untuk semua tahap beban. Protokol pembebanan berdasarkan sudut rotasi link dan jumlah siklus ditunjukkan pada **Gambar 3**.

3. Hasil dan Pembahasan

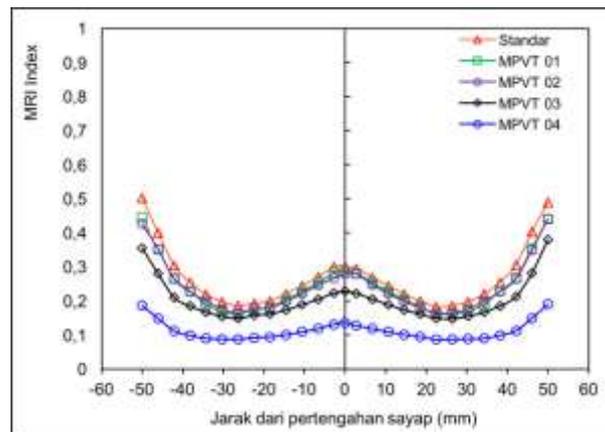
Kriteria inisiasi fraktur daktil berdasarkan indikator kinerja dari benda uji link panjang standar dan modifikasi menggunakan perbandingan nilai *Failure index* dan *PEEQ index*. Analisis terhadap variabel *failure index* dan *PEEQ index* pada benda uji standar, MPVT dan MPVL dilakukan untuk melihat posisi terjadinya inisiasi fraktur yang terjadi pada zona kritis. Pada penelitian ini, nilai *failure index* dihitung berdasarkan persamaan MRI yang diusulkan oleh Chao, dkk [20]. AISC 341-10 mensyaratkan sudut rotasi plastis untuk benda uji link panjang sebesar 0,02 radian. Dengan mengasumsikan bahwa kelelahan yang terjadi pada model benda uji link panjang adalah seragam pada sudut rotasi 0,01 radian, maka sudut rotasi total yang harus terpenuhi oleh model benda uji link panjang sebesar 0,03 radian. Perbandingan terhadap nilai *failure index* dan *PEEQ index* dilakukan dengan menganalisis pada titik acuan yang seragam, yaitu pada sayap profil di ujung link. Posisi analisis yang ditinjau tersebut dikarenakan zona regangan kritis benda uji terdapat pada sayap link di ujung – ujung link sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Zona kritis link Panjang
Sumber: Penulis

Gambar 5 dan **Gambar 6** menunjukkan masing – masing nilai perbandingan *failure index* dan *PEEQ index* untuk benda uji link panjang modifikasi dengan variasi tebal pelat tepi pengaku ganda tambahan (MPVT). Sebagai pembandingan untuk model benda uji MPVT di analisis juga nilai *failure index* dan *PEEQ index* untuk benda uji standar. Model kurva menunjukkan bentuk yang simetris, di mana nilai maksimum terdapat pada jarak paling ujung dari sayap profil benda uji. Nilai *failure index* dan *PEEQ index* pada benda uji standar lebih tinggi dibandingkan dengan benda uji lainnya, hal ini menunjukkan bahwa penambahan pelat tepi ganda pada kedua sisi badan profil WF efektif mengurangi nilai regangan plastis pada zona kritis.

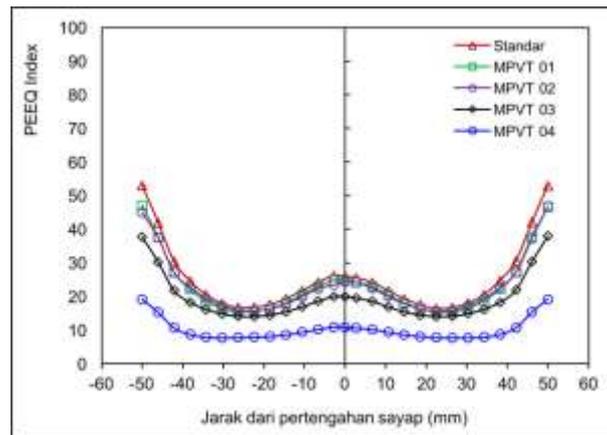
Nilai *failure index* dan *PEEQ index* benda uji MPVT01 dan MPVT02 menunjukkan nilai yang hampir sama, hal ini dapat dinyatakan bahwa ketebalan pelat 4 mm dan 6 mm tidak memberikan hasil yang secara signifikan berbeda. Benda uji MPVT03 menunjukkan nilai *failure index* dan *PEEQ index* yang lebih kecil dari benda uji standar, MPVT01 dan MPVT02. Benda uji MPVT04 mempunyai nilai *failure index* dan *PEEQ index* yang lebih kecil dibandingkan dengan model lainnya, hal ini dikarenakan terjadinya pergeseran zona kritis dari ujung – ujung link menuju ke arah dari tumpuan link. Meskipun pola kurva yang hampir sama, model benda uji link panjang modifikasi efektif dalam mengurangi konsentrasi regangan plastis yang besar pada zona kritis yang berada pada tepi terluar sayap – sayap di ujung – ujung link sebagaimana yang terbentuk pada benda uji standar.



Gambar 5. Perbandingan nilai *failure index* benda uji MPVT pada sudut rotasi 0,03 rad
Sumber: Penulis

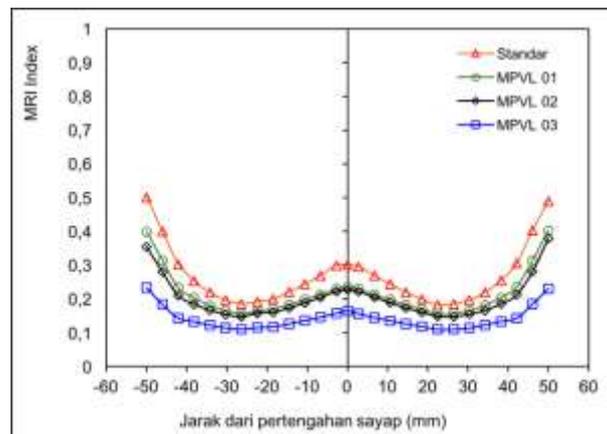
Gambar 7 dan **Gambar 8** menunjukkan nilai perbandingan *failure index* dan *PEEQ index* untuk benda uji link panjang modifikasi dengan variasi jarak vertikal pelat sayap ke tepi lubang pada pelat pengaku (MPVL). Model kurva menunjukkan bentuk yang simetris, di mana nilai maksimum terdapat pada jarak paling ujung dari sayap profil benda uji. Nilai *failure index* dan *PEEQ index* pada benda uji standar lebih tinggi dibandingkan dengan benda uji lainnya, hal ini menunjukkan bahwa penambahan pelat tepi ganda dengan variasi lebar lubang arah vertikal yang diberikan pada kedua sisi badan profil WF efektif mengurangi nilai regangan plastis pada zona kritis. Nilai *failure index* dan *PEEQ index* MPVL01 dan MPVL02 menunjukkan nilai yang hampir sama, hal ini dapat dinyatakan bahwa tinggi nilai T_h sebesar 20

mm dan 30 mm tidak memberikan pengaruh yang signifikan untuk posisi zona kritis yang tetap terbentuk pada pelat sayap di ujung – ujung link.

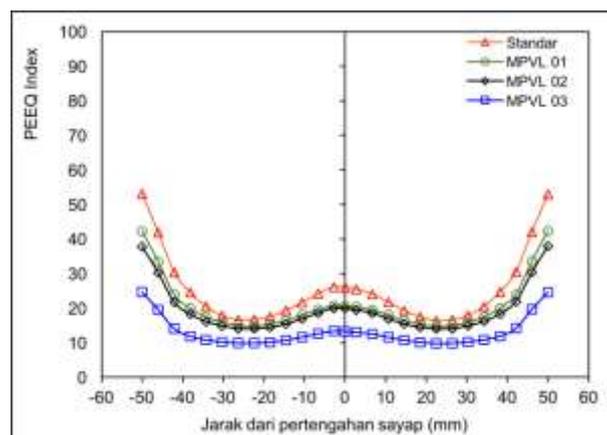


Gambar 6. Perbandingan nilai PEEQ *index* benda uji MPVT pada sudut rotasi 0,03 rad
 Sumber: Penulis

Benda uji MPVL03 menunjukkan nilai *failure index* dan PEEQ *index* yang lebih kecil dari benda uji standar, MPVL01 dan MPVL02. Meskipun pola kurva yang hampir sama, model ini efektif dalam mengurangi konsentrasi regangan dan tegangan plastis yang besar pada zona kritis di ujung – ujung sebagaimana yang terbentuk pada benda uji lainnya. Benda uji MPVL03 mempunyai nilai *failure index* dan PEEQ *index* yang lebih kecil dibandingkan dengan model lainnya, hal ini dikarenakan terjadinya perpanjangan plastifikasi dan pergeseran zona kritis dari ujung – ujung link menuju ke arah dalam dari tumpuan link.



Gambar 7. Perbandingan nilai MRI *index* benda uji MPVL pada sudut rotasi 0,03 rad
 Sumber: Penulis



Gambar 8. Perbandingan nilai PEEQ *index* benda uji MPVL pada sudut rotasi 0,03 rad
 Sumber: Penulis

Perilaku peralihan dan perpanjangan zona plastifikasi pada benda uji MPVL03 dan MPVT04 menunjukkan pola yang sama, di mana terjadinya pergeseran nilai regangan kritis dari tumpuan link ke arah dalam yang terbentuk berada pada sayap link saat memasuki *strain hardening* sebelum benda uji mengalami kegagalan. Posisi terjadinya regangan kritis benda uji standar, MPVT dan MPVL terdapat pada pelat sayap di kedua sisi terluar pada rentang jarak 40 – 50 mm dari sumbu utama profil WF, sedangkan pada posisi lainnya relatif konstan kecuali sedikit terjadi peningkatan pada pertengahan pelat sayap profil WF. Lokasi regangan kritis menunjukkan potensi terjadinya inisiasi kegagalan daktil pada benda uji akibat propagasi fraktur.

Pengaruh penggunaan pelat tepi pengaku ganda tambahan dengan ketebalan sebesar 4 mm dan 6 mm pada benda uji MPVT dan lebar lubang dengan variabel T_h sebesar 20 mm dan 30 mm pada benda uji MPVL tidak memberikan pengaruh yang terlalu signifikan terhadap peningkatan kinerja link panjang modifikasi. Terjadinya penurunan nilai MRI dan PEEQ *index* yang sangat besar pada zona regangan kritis untuk benda uji MPVT04 dan MPVL03 terhadap benda uji standar dibandingkan dengan benda uji lainnya. Penurunan nilai tersebut menunjukkan adanya pengaruh yang sangat kuat terhadap variabel tebal dan lebar lubang terhadap pengurangan nilai regangan plastis ekuivalen pada zona kritis, sehingga potensi terjadinya inisiasi kegagalan daktil akibat fraktur lebih cepat pada zona kritis dapat dihindari.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi numerik yang dilakukan terhadap beberapa parameter penting yang dianggap berpengaruh secara signifikan terhadap kinerja link panjang standar dan link panjang modifikasi, dapat disimpulkan bahwa inisiasi terjadinya fraktur pada pelat sayap di ujung – ujung link dapat diperlambat dengan penambahan pelat pengaku tepi ganda. Kondisi tersebut dapat dilihat berdasarkan penurunan nilai MRI dan PEEQ *index* pada zona kritis pada spesimen uji link panjang modifikasi terhadap link panjang standar sesuai persyaratan AISC 341.

5. Referensi

- [1] K. D. Hjelmstad and E. P. Popov, "Characteristics of eccentrically braced frames," *Journal of Structural Engineering (United States)*, vol. 110, no. 2, pp. 340–353, 1984, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:2(340).
- [2] K. D. Hjelmstad and E. P. Popov, "Cyclic behavior and design of link beams," *Journal of Structural Engineering (United States)*, vol. 109, no. 10, pp. 2387–2403, 1983, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1983)109:10(2387).
- [3] AISC. 2016, *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 341-16*. Chicago, 2016. doi: 10.1201/b11248-8.
- [4] P. W. Richards and C. M. Uang, "Effect of flange width-thickness ratio on eccentrically braced frames link cyclic rotation capacity," *Journal of Structural Engineering*, vol. 131, no. 10, pp. 1546–1552, 2005, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:10(1546).
- [5] S. Kazemzadeh Azad and C. Topkaya, "A review of research on steel eccentrically braced frames," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 128. Elsevier Ltd, pp. 53–73, Jan. 01, 2017. doi: 10.1016/j.jcsr.2016.07.032.
- [6] A. Daneshmand and B. H. Hashemi, "Performance of intermediate and long links in eccentrically braced frames," *J Constr Steel Res*, vol. 70, pp. 167–176, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.jcsr.2011.10.011.
- [7] 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, Jun. 2007, doi: 10.1016/j.jcsr.2006.08.004.
- [8] T. Okazaki, G. Arce, H.-C. Ryu, and M. D. Engelhardt, "Experimental Study of Local Buckling, Overstrength, and Fracture of Links in Eccentrically Braced Frames," *Journal of Structural Engineering (United States)*, vol. 131, pp. 1526–1535, 2005, doi: 10.1061/ASCE0733-94452005131:101526.
- [9] M. Musbar, B. Budiono, D. Kusumastuti, and H. D. Setio, "Behavior of Modified Long Links with Supplemental Double Stiffeners on Eccentrically Braced Frames," *Int J Adv Sci Eng Inf Technol*, vol. 8, no. 6, p. 2516, Dec. 2018, doi: 10.18517/ijaseit.8.6.5852.
- [10] Musbar, "Behavior of the Link Coupling Beam on the Eccentrically Braced Frame," *Journal of Southwest Jiaotong University*, vol. 58, no. 4, 2023, doi: 10.35741/issn.0258-2724.58.4.54.
- [11] R. Chacón, A. Vega, and E. Mirambell, "Numerical study on stainless steel I-shaped links on eccentrically braced frames," *J Constr Steel Res*, vol. 159, pp. 67–80, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.jcsr.2019.04.014.

- [12] A. Keivan and Y. Zhang, "Seismic performance evaluation of self-centering K-type and D-type eccentrically braced frame systems," *Eng Struct*, vol. 184, pp. 301–317, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.01.087.
- [13] H. Wen and H. Mahmoud, "A new approach to predict cyclic response and fracture of shear links and eccentrically braced frames," *Front Built Environ*, vol. 4, Feb. 2018, doi: 10.3389/fbuil.2018.00011.
- [14] M. Naghavi, R. Rahnavard, R. J. Thomas, and M. Malekinejad, "Numerical evaluation of the hysteretic behavior of concentrically braced frames and buckling restrained brace frame systems," *Journal of Building Engineering*, vol. 22, pp. 415–428, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.job.2018.12.023.
- [15] V. Mohsenian, R. Filizadeh, Z. Ozdemir, and I. Hajirasouliha, "Seismic performance evaluation of deficient steel moment-resisting frames retrofitted by vertical link elements," *Structures*, vol. 26, pp. 724–736, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.04.043.
- [16] P. Dusicka, A. M. Itani, and I. G. Buckle, "Cyclic behavior of shear links of various grades of plate steel," *Journal of Structural Engineering*, vol. 136, no. 4, pp. 370–378, 2010, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000131.
- [17] G. Della Corte, M. D'Aniello, and R. Landolfo, "Analytical and numerical study of plastic overstrength of shear links," *J Constr Steel Res*, vol. 82, pp. 19–32, 2013, doi: 10.1016/j.jcsr.2012.11.013.
- [18] M. Stephens and P. Dusicka, "Analytical and numerical evaluation of continuously stiffened composite web shear links," *Journal of Structural Engineering (United States)*, vol. 140, no. 6, Jun. 2014, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001029.
- [19] M. Stephens and P. Dusicka, "Continuously stiffened composite web shear links: Tests and numerical model validation," *Journal of Structural Engineering (United States)*, vol. 140, no. 7, Jul. 2014, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000996.
- [20] Chao, Shih-Ho, Kapil Khandelwal, and Sherif El-Tawil. "Ductile web fracture initiation in steel shear links." *Journal of structural engineering* 132.8 (2006): 1192-1200.