

Upaya perbaikan sambungan link ke kolom telah dilakukan oleh Okazaki dkk (2004,2005) dengan perubahan metode sambungan end plate tidak hanya metode pengelasan juga tipe perkuatan sambungan. Moestopo dan Panjaitan (2012) juga telah melakukan perbaikan kinerja dari link pendek dengan melakukan perkuatan dengan menambah wing plate serta peningkatan mutu flange dengan menggunakan link built up. Moestopo dan panjaitan memberikan catatan bahwa *failure* yang terjadi di ujung *end plate* disebabkan oleh *residual stress* tarik yang besar pada permukaan atas *flange* di area *weld toe* dan HAZ. Meski indikasi awal *failure* pada pelat disebabkan oleh *residual stress* namun fenomena ini tidak di bahas detail dalam penelitian Moestopo dan Panjaitan. Penelitian mengenai *residual stress* cukup detail dilakukan oleh Dong dkk (1996) untuk sambungan balok dengan kolom pada struktur MRF namun kajian yang dilakukan masih kajian numerik.

Selanjutnya, dari sejumlah pengujian pada penelitian terdahulu (Arce, 2004; Okazaki dkk, 2005; Yurisman dkk, 2010; Moestopo dan Panjaitan, 2012;) telah dilakukan upaya perkuatan ujung end plate dalam rangka peningkatan kinerja dari elemen link. Namun saat ini penelitian terkait residual stress pada ujung end plate dari link belum diteliti secara mendalam.

Dalam aplikasi teknik sipil, efek dari tegangan sisa (*residual stress*) saat ini tidak secara tegas (*eksplisit*) diperhitungkan dalam sambungan antara satu pelat dengan pelat lain khususnya untuk baja dengan mutu tinggi. Oleh karena itu, perkiraan yang baik dari efek tegangan sisa akibat pengelasan sangat diperlukan ketika digunakan pada sambungan seperti pada kasus sambungan pelat ujung link dengan end plate.

Selanjutnya, penelitian ini dilakukan untuk memahami lebih detail besaran dan distribusi tegangan sisa di area sambungan ujung antara pelat sayap dengan end plate terutama untuk kasus link yang dapat digantikan sehingga perbaikan kinerja dari elemen *link* SRBE dapat ditingkatkan. Pada penelitian ini pengukuran tegangan sisa dilakukan secara eksperimental menggunakan metode neutron diffraction. Link yang sudah diukur residual stress selanjutnya di uji dengan beban siklik sesuai pola pembebanan AISC 341-10.

Pengujian Secara Eksperimental

Pada penelitian ini, pengujian secara eksperimental dilakukan dengan dua tahap. Pengujian tahap pertama bertujuan mendapatkan besaran dan distribusi tegangan sisa sedangkan pengujian tahap kedua bertujuan mempelajari perilaku dan kinerja dari elemen link SRBE. Selanjutnya, detail dari kedua pengujian dijelaskan sebagai berikut :

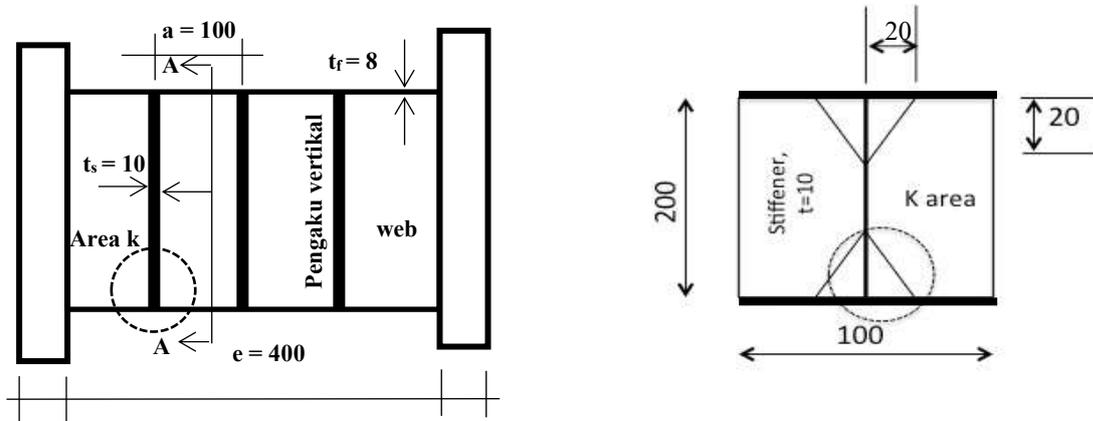


Pengukuran Tegangan Sisa

Pengukuran residual stress pada area k dari elemen link telah dilakukan peneliti (2016). Selanjutnya dalam penelitian ini pengukuran akan dilakukan pada ujung end plate dari elemen link. Pengukuran tegangan sisa dilakukan menggunakan alat *Diffractometer Neutron* DN1-M PTBIN Batan yang terpasang pada tabung berkas nomor 6 (S-6) di RSG GAS Batan Serpong sebagaimana gambar 1. Detail ukuran dari Gambar dan sampel ditunjukkan dalam Tabel 1.

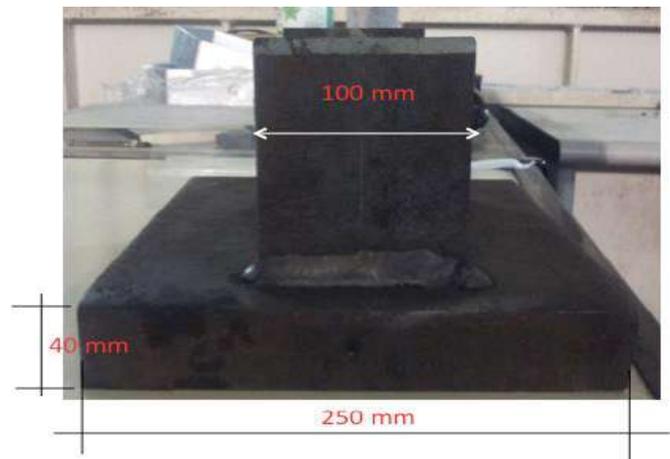
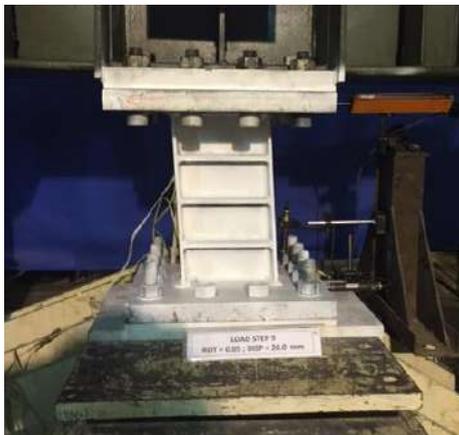
Tabel 1 Dimensi dari sampel K10x10 dan K20x10

Profil	Tebal end plate (mm)	Tebal Pelat Badan (mm)	Tebal Pelat Sayap (mm)	Panjang Link (mm)
WF200.100	40	5,5	8	400



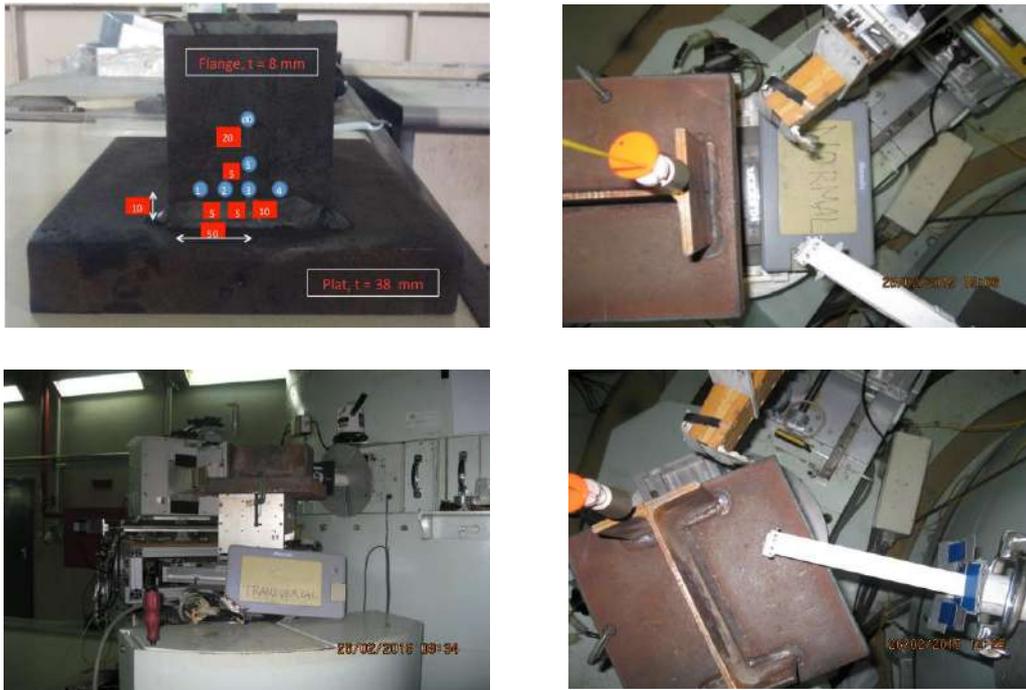
Detail elemen link

Potongan A- A



Gambar 2 Detail sampel yang diukur

Selanjutnya, arah dan titik pengukuran sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3



Gambar 3 Arah dan titik pengukuran tegangan sisa

Pengukuran dilakukan dengan sudut hamburan sebesar 103° untuk bidang 211 dari indeks miller dengan panjang gelombang $1,836863 \text{ \AA}$. *Slit incident beam* yang digunakan $3 \times 3 \text{ mm}$ dan *detector beam* menggunakan radial kolimator 7 mm . Masing-masing titik pengukuran dilakukan selama 60 menit untuk arah normal dan 90 menit untuk arah transversal maupun longitudinal. . Detail jarak masing-masing titik pengukuran dapat dilihat dari Gambar 4.

Adapun parameter pengukuran yang digunakan sebagaimana tabel 2.

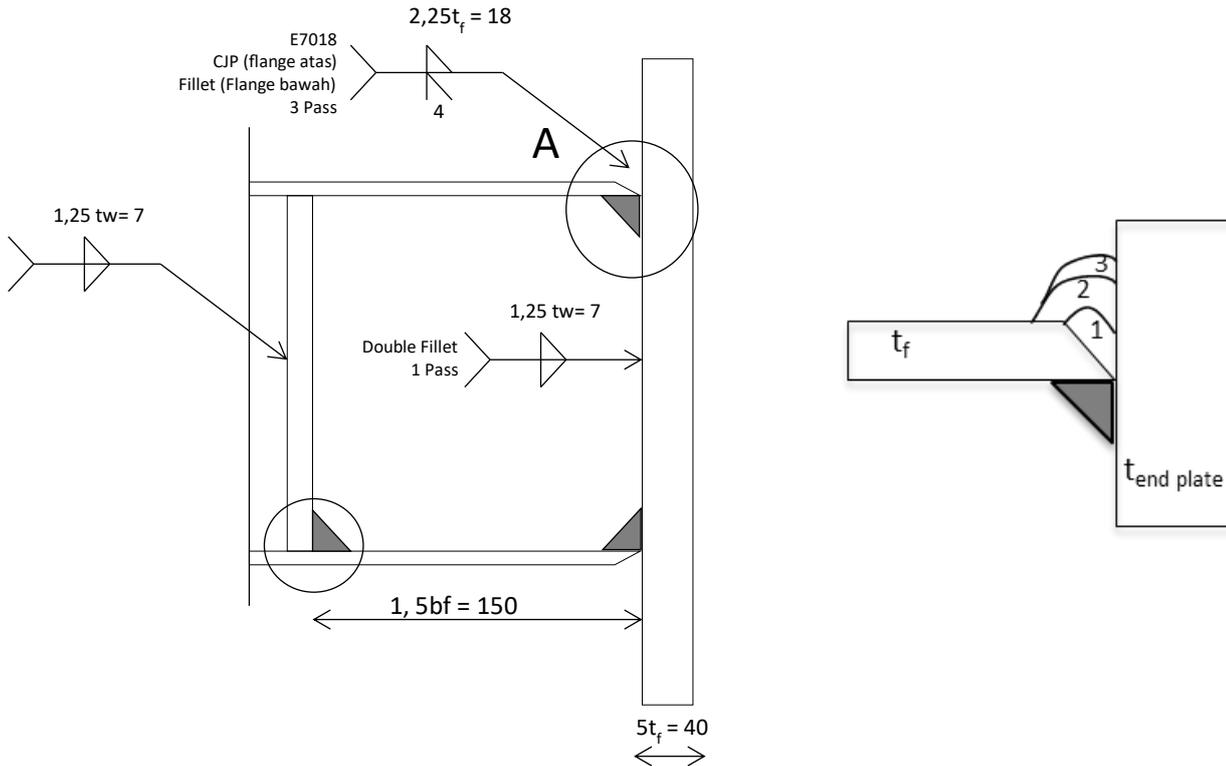
Tabel 2 Nilai parameter eksperimen

$\lambda(\text{\AA})$	$2\theta (^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	$A(\text{\AA})$	d	Indeks miller (hkl)	Waktu satu titik	<i>Slit Incident Beam</i>	<i>Slit Detector</i>
1,836863	103	51,5	2,87	1,15	211	90 menit	$3 \times 3 \text{ mm}$	Radial kolimator 7

Metode difraksi neutron dapat digunakan secara langsung untuk mengukur regangan (strain) dengan mengukur jarak kisi kristal. Nilai tegangan dapat dihitung dalam 3 arah menggunakan Persamaan (1).

$$\sigma_i = \frac{E_{211}}{(1+\nu_{211})} \left\{ \frac{\epsilon_i + \nu_{211}}{(1-2\nu_{211})(\epsilon_z + \epsilon_y + \epsilon_x)} \right\} \quad \text{dimana } (i = X, Y, Z) \quad (1)$$

Adapun detail sambungan sebagai berikut :

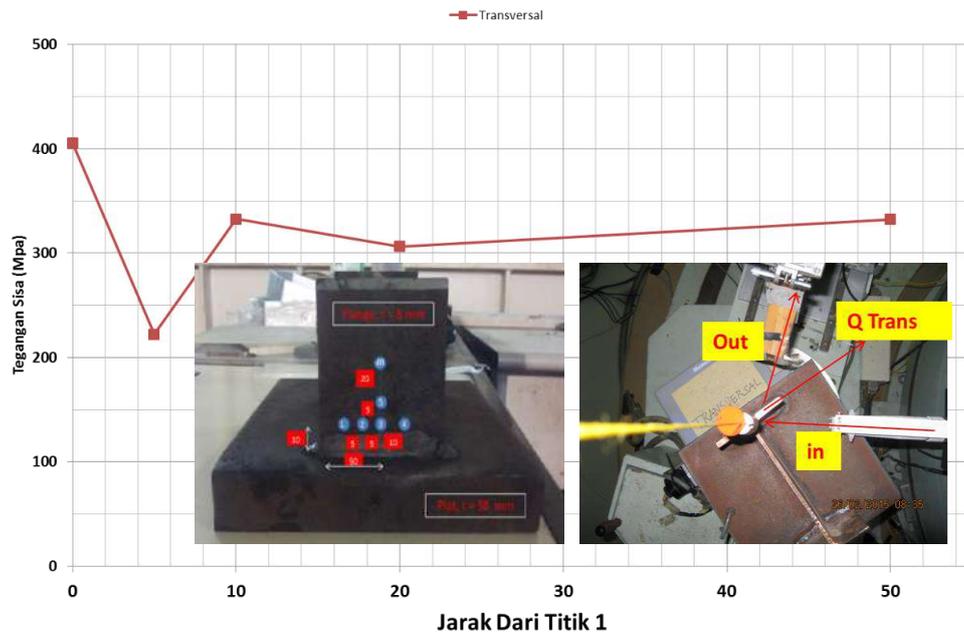


Menggunakan Persamaan 1 serta nilai E211 diambil sebesar 2.106 Mpa dan ν_{211} sebesar 0,3 maka diperoleh tegangan sisa sebagaimana Tabel 3 dan diperlihatkan pada Gambar 5.

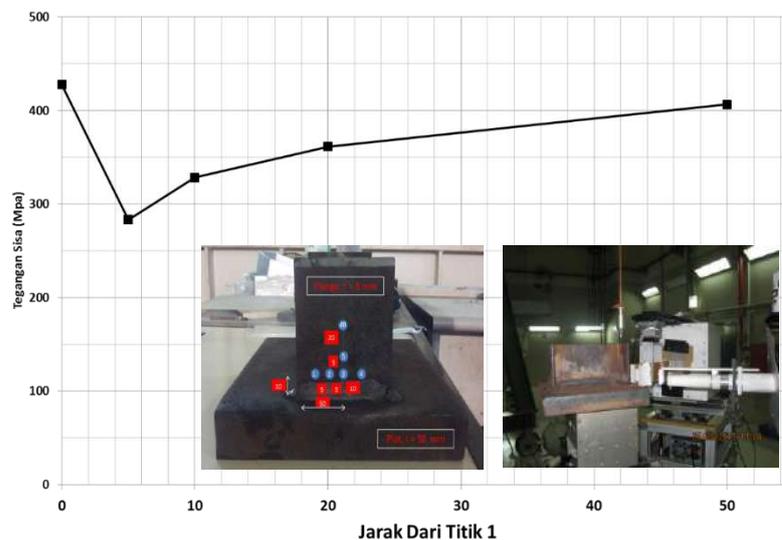
Tabel 3 Nilai *residual stress* dalam transversal dan longitudinal

Titik Pengukuran	Posisi (mm)	Stress Arah Transversal (Mpa)	Stress Arah Longitudinal (Mpa)
X1	0	405.66	427.59
X2	5	222.38	283.16
X3	10	332.86	328.46
X4	20	306.28	361.38
X4a	50	332.57	406.63

Pengukuran dalam arah transversal



Gambar 5 Hasil pengukuran kedua sampel



Gambar 5 Hasil pengukuran kedua sampel

Dari grafik pada gambar 5 terlihat pola distribusi tegangan sisa area pengelasan menunjukkan distribusi yang sama baik dalam arah transversal maupun longitudinal untuk kedua sampel yaitu K10x10 dan K20x10. Selanjutnya di daerah sekitar weld toe besarnya bernilai positif (tegangan sisa tarik) terus cenderung menurun pada area HAZ dan menjadi negatif dengan semakin jauh dari titik weld toe. Hal ini disebabkan oleh panas yang lebih tinggi diterima oleh bagian elemen link di dekat titik *pengelasan (weld pool)* saat proses pengelasan di dibandingkan dengan daerah HAZ dan ujung dari pelat badan.

Dari gambar 5 juga terlihat perbedaan yang cukup signifikan di area weld toe pada daerah k antara sampel K10x10 dan sampel K20x10 dalam arah transversal maupun longitudinal. Tingginya nilai tegangan sisa di area weld toe di dan sekitar area k dari link dapat menyebabkan inisiasi *crack* dari area k saat beban luar bekerja.

Selanjutnya dari gambar menghindari las di daerah k (sampel K20x10) menghasilkan besaran dan distribusi tegangan sisa yang lebih kecil di sekitar area weld toe dan HAZ. Mengingat tegangan sisa tarik yang cukup tinggi di dan sekitar area k maka perlakuan ini cukup penting saat pengujian sampel link yang akan dikenai dengan beban luar. Perilaku link yang teramati sebagaimana gambar 1 iniasi crack di mulai di area k ini. Menghindari pengelasan di daerah k dapat memperlambat iniasi crack di sekitar area k dari elemen link.

Dari hasil pengujian tarik diperoleh nilai tegangan leleh (f_y) pada tengah pelat badan diperoleh sebesar 315 Mpa dan tegangan ultimit sebesar 490 Mpa. Hasil ini sedikit berbeda nilainya pada pengujian di “daerah k” yaitu 318 Mpa dan 497 Mpa untuk masing-masing tegangan leleh (f_y) dan tegangan ultimit (f_u) sebagaimana ditunjukkan pada gambar 8a.

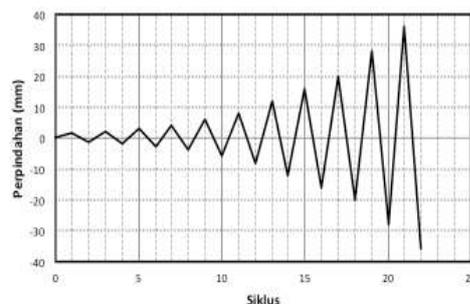
Selanjutnya dari hasil eksperimen memperlihatkan nilai tegangan sisa tarik yang diperoleh di daerah weld toe berada dalam interval 75 s.d 85 % dari tegangan leleh material dan cenderung turun dalam area HAZ yang berkisar antar 50 sampai dengan 60 % dari tegangan leleh baik dalam arah transversal maupun longitudinal. Sedangkan lebar area tarik mencapai 6 kali tebal pelat badan untuk tegangan sisa dalam arah transversal dan 4 kali dari pelat badan dalam arah longitudinal.

Pengujian Siklik dari Elemen Link

Pengujian tahap dua menggunakan *link* dengan panjang 700 mm. Panjang link ini digunakan mengingat gaya geser dan gaya momen terbesar dihasilkan karena berada di area transisi antara link pendek dengan link menengah. Jumlah link yang diuji sebanyak dua buah. Satu link standar yang didesain sesuai AISC 341-10 sebagaimana detail ditunjukkan pada gambar 2 dan satu link modifikasi. Kedua link menggunakan profil WF200.100. Selanjutnya *Set up* pengujian dan pola pembebanan pada link diperlihatkan sebagaimana Gambar 7 berikut :



a. Set up pengujian link pendek



b. Pola pembebanan

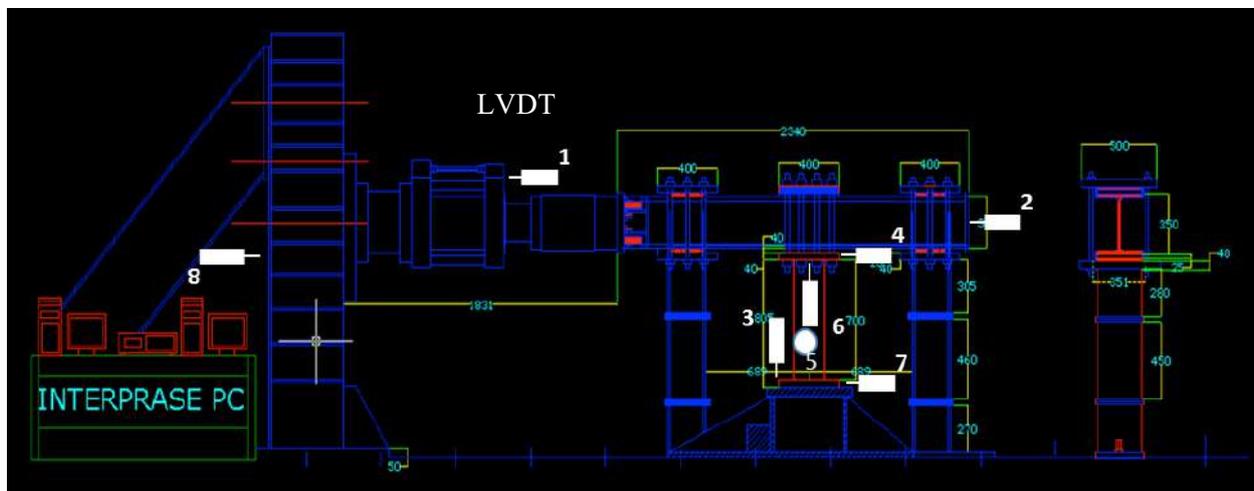
Gambar 7 Set up pengujian dan pola pembebanan dari link

Detail dimensi dari *link* modifikasi sebagaimana Tabel 4 dan Gambar 6.

Tabel 4 Dimensi sampel elemen link (semua satuan dalam mm kecuali ada disebut lain)

Profil	Lebar (b)	Tinggi (d)	Panjang Link (e)	Tebal web (t_w)	Tebal Stiffeners (t_s)	Tebal Flange (t_f)	V_p (KN)	M_p (KNm)	$(e \cdot V_p) / M_p$
WF200	100	200	400	5,5	10	8	230,7	74,7	2,16

Penempatan dari masing-masing *Strain gauge* dan LVDT dapat dilihat pada Gambar 9.

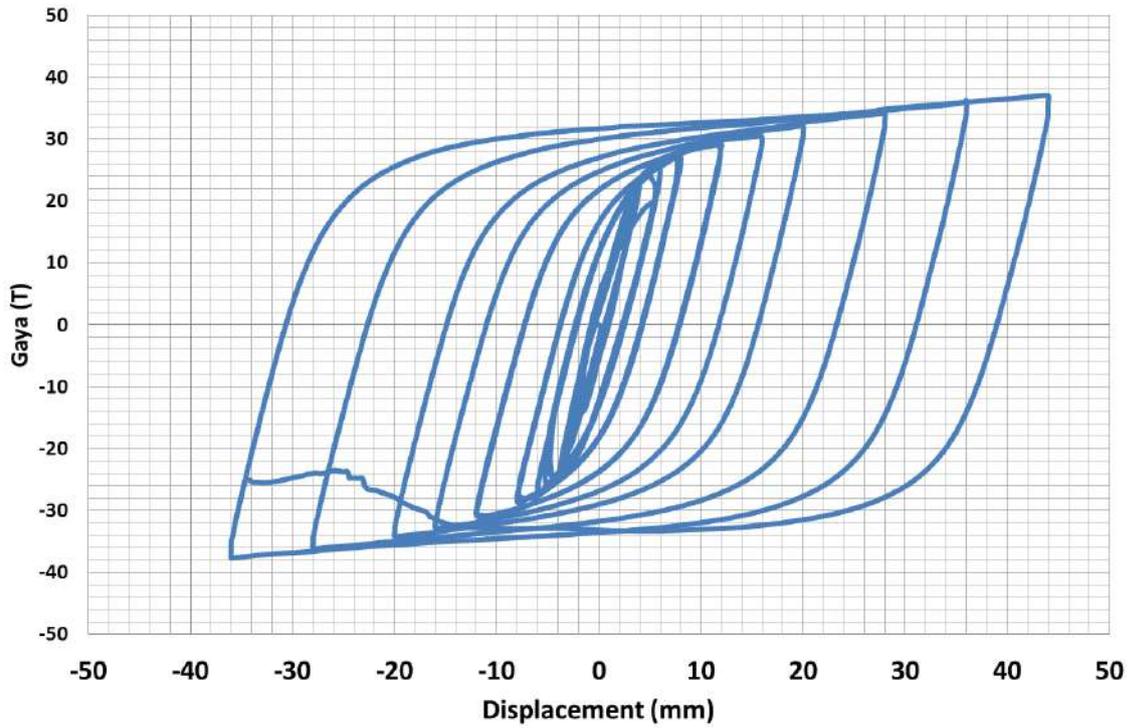


Gambar 9 Posisi peletakan *Strain gauge* dan LVDT

Dari hasil pengujian diperoleh perbandingan kurva histeristik dari link standar (sampel 1) dengan link modifikasi (sampel 2) sebagaimana Gambar 10 berikut .

Dari gambar terlihat pada saat perpindahan mencapai 28 mm, link standar mengalami *failure* di ujung sayap dari elemen link namun link modifikasi masih dalam kondisi normal tanpa mengalami *failure* atau kegagalan bahkan perpindahan dapat dicapai 36 mm. Modifikasi dengan menghindari pengelasan di area k yang mempunyai tegangan sisa tarik yang tinggi pada link ternyata dapat memperlambat terjadinya *crack* dan mempertinggi nilai daktilitas yang di peroleh sebagaimana ditunjukkan oleh sampel 2 dari gambar 10. Beberapa kegagalan dari link standard an perilaku link menengah ditunjukkan pada Gambar 11 berikut.

Profil	Lebar (b)	Tinggi (d)	Panjang Link (e)	$(e.V_p)/M_p$	V_p (KN)	M_p (KNm)	V_u (T)	Rotasi (rad)
WF200	100	200	400	2,16	230,7	74,7	38,5	0,11



Gambar 10 Perbandingan kurva histeristik link standar dengan modifikasi

Kesimpulan

Dari hasil analisis di atas maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- Pola distribusi tegangan sisa pada area lasan secara eksperimental mempunyai kecenderungan yang sama baik dalam arah transversal maupun longitudinal . Selanjutnya tegangan sisa di daerah sekitar *weld toe* besarnya bernilai positif (tegangan sisa tarik) terus cenderung menurun pada area HAZ

dan menjadi negatif dengan semakin jauh dari titik *weld toe*. Hal ini disebabkan panas yang diterima di area *weld toe* jauh lebih besar disbanding dengan area diluarnya.

- Nilai tegangan sisa tarik yang diperoleh dari hasil pengukuran dengan metode difraksi neutron di daerah *weld toe* berada dalam interval 75 s.d 85 % dari tegangan leleh material dan cenderung turun dalam are HAZ yang berkisar antar 50 sampai dengan 60 % dari tegangan leleh baik dalam arah transversal maupun longitudinal.
- Perilaku elemen link modifikasi dengan menambah pengaku horizontal untuk menghindari daerah k yang dapat menyebabkan tegangan sisa tarik yang tinggi ternyata mampu meningkatkan daktilitas dari elemen link . Selanjutnya perkuatan pelat ujung sayap juga terbukti mampu memperlambat proses *buckling*. Gambar 10 menunjukkan kinerja link modifikasi lebih baik dibandingkan dengan link standar. Menghindari area k yang memiliki nilai tegangan sisa tarik yang tinggi dapat meningkatkan kinerja dari elemen link karena daktilitas dari elemen link dapat ditingkatkan.
- Sebagai catatan benang merah dari gambar 10 bahwa saat desain link memperhitungkan nilai tegangan sisa maka kapasitas link (V_u) perlu dikalikan dengan konstanta yang lebih kecil dari 1. Nilai konstanta ini merupakan koefisien yang mempertimbangkan pengaruh dari *residual stres*. Penentuan besarnya nilai konstanta ini menjadi topik penelitian yang perlu kajian lebih lanjut.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada Bapak Drs. Gunawan, M.Sc selaku kepala Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju (PSTBM) BATAN yang telah mengizinkan dilakukan pengukuran di PSTBM, selanjutnya Bapak Drs. Sutiarmo, M.Sc selaku Kepala Bidang Teknologi Berkas Neutron yang telah banyak memberikan bantuan, saran dan izinnya dalam penggunaan alat DN1-M .

Daftar Pustaka

- American Institute of Steel Construction, 2010, Seismic Provision for Structural Steel Buildings, AISC, Inc.
- Arce, G., 2002, Impact of Higher Strength Steels on Local Buckling and Over Strength of Links in Eccentrically Braced Frames, MS Thesis, USA: Univ. of Texas at Austin.
- Engelhardt, M.D., dan Popov, E.P., 1992, Experimental Performance of Long Links in Eccentrically Braced Frames, Journal of Structural Engineering, Vol.118, No.11:3067-3088, November, ASCE.
- Hjelmstad, K.D., dan Popov, E.P., 1984, Characteristics of Eccentrically Braced Frame, Journal of Structural Engineering, Vol. 110 No. 2:340-353.
- Kasai, K., dan Popov, E.P., 1986, General Behavior of WF Steel Shear Link Beams, Journal of the Structural Division, Vol.112, No.2:362-382, February, ASCE.
- Kurdi, Budiono, B., Moestopo, M, Kusumastuti, D., dan Muslih, M., R., 2014, Kajian Eksperimental Besaran dan Distribusi Tegangan Sisa Elemen Link Pada Struktur Rangka Baja Berpengaku Eksentrik (SRBE) dengan Metode Difraksi Neutron (Neutron Diffraction Method), Konferensi Nasional Pascasarjana Teknik Sipil, Bandung, 6 November.
- Kurdi, Budiono, B., Moestopo, M, Kusumastuti, D., dan Muslih, M., R.,, 2016, Kuantifikasi Besaran dan Distribusi Tegangan Sisa Daerah Pertemuan Pengaku-Badan-Sayap pada Elemen Link Struktur Rangka Baja Berpengaku Eksentrik (SRBE) dengan Metode Difraksi Neutron, Jurnal Teknik Sipil ITB, Vol.23 No.1 April. (Dalam proses cetakan).
- Budiono, B., Kurdi., Moestopo, M, Kusumastuti, D., dan Muslih, M., R., 2016, Residual Stress on K-Area of Link Element Using Neutron Diffraction Method, Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials, SCESCM 2016, Bali, Indonesia (Paper dalam tahap review)
- Malley, J.O., dan Popov, E.P., 1983, Shear Links in Eccentrically Braced Frames, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 10.



- Moestopo, M., dan Panjaitan, M.,A.,R., 2012, Kajian Eksperimental Peningkatan Kinerja Link Geser pada Sistem Rangka Baja Berpengaku Eksentrik, Jurnal Teknik Sipil ITB , Vol.19 No.2 Agustus 2012, Program Studi Teknik Sipil ITB.
- Okazaki, T., Arce, G., Ryu, H.C., and Engelhardt, M.D. 2005, Experimental Study of Local Buckling, Over strength, and Fracture of Links in Eccentrically Braced Frames, Journal of Structural Engineering, 1526-1535, October, ASCE.
- Okazaki, T., Engelhardt, M.D., Drolias, A., Schell, E., Hong, J.K., and Uang, C.M.,2009, Experimental Investigation of Link-to-column Connections in Eccentrically Braced Frames, Journal of Constructional Steel Research, 65 (7), pp. 1401-1412.
- Yurisman, Budiono, B., Moestopo, M., dan Made, S., 2010, Behaviour of Shear Link of WF Section with Diagonal Web Stiffener Eccentrically Braced Frame (EBF) of Steel Structure, ITB Journal of Engineering Science (international journal), Vol.42 No.2.