

JURNAL TEKNIK SIPIL

Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil

Kuantifikasi Besaran dan Distribusi Tegangan Sisa Daerah Pertemuan Pengaku-Badan-Sayap pada Elemen *Link* Struktur Rangka Baja Berpengaku Eksentrik (SRBE) dengan Metode Difraksi Neutron

Kurdi

Program Doktor Bidang Keahlian Rekayasa Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan-
Institut Teknologi Bandung, E-mail: kurdi1206@gmail.com

Bambang Budiono

Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan-
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa No.10 Bandung 40132, E-mail: b.budiono1995@gmail.com

Muslinang Moestopo

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

Dyah Kusumastuti

Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan-Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No.10 Bandung 40132, E-mail: dkusumastuti@gmail.com

M. Refai Muslih

Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju (PSTBM)-BATAN, Kawasan Puspitek Serpong, Tangerang 15314
E-mail: rifai@batan.go.id

Abstrak

Penelitian ini memfokuskan kajian secara eksperimental terhadap besaran dan distribusi tegangan sisa yang dihasilkan dari proses pengelasan di dan sekitar daerah k dari elemen link. Pengukuran dilakukan dengan Metode Difraksi Neutron menggunakan alat Difraktometer Neutron DNI-M PSTBM BATAN. Sebanyak 15 titik dengan 45 arah pengukuran dilakukan di daerah k dalam arah normal, transversal maupun longitudinal. Hasil eksperimen menunjukkan besaran tegangan sisa tarik sebesar 185 Mpa dan 160 Mpa dalam arah longitudinal dan transversal searah weld toe pengelasan antara badan dan sayap dengan luasan daerah tarik 8 kali dari tebal flange. Untuk pengelasan tegak lurus weld toe diperoleh tegangan sisa tarik sebesar 162 Mpa dan 145 Mpa dalam arah longitudinal dan transversal dengan luas daerah tarik 4 kali dari tebal flange. Besarnya tegangan sisa tarik dan lebarnya daerah tarik mengindikasikan daerah k merupakan daerah rawan terjadinya awal dari crack yang dapat menurunkan kinerja dari link. Membuat gap pengelasan antara pengaku dengan flange selebar 4 s/d 5 kali tebal flange dapat meningkatkan kinerja dari link karena dapat meminimalkan besaran dan distribusi tegangan sisa tarik.

Kata-kata Kunci: Daerah k, Tegangan sisa (residual stress), Link, Neutron diffraction, Struktur Rangka Baja Berpengaku Eksentrik (SRBE).

Abstract

This research focused on the experimental study on the residual stress magnitude and distribution resulted from the welding process in and around the k area of the link element. The measurement was done with the Neutron Diffraction Method using the Neutron Diffractometer DNI-M PSTBM BATAN. A number of 15 points with 45 measurement directions were conducted on the k area in normal, transversal and longitudinal directions. The result of the experiment showed 185 Mpa and 160 Mpa residual stress magnitude in longitudinal and transversal directions in the same directions with the weld toe welding between the web and flange with the extent of the stress area 8 times of the flange thickness. The perpendicular welding of the weld toe resulted in 162 Mpa and 145 Mpa residual stresses in longitudinal and transversal directions with 4 times stress area extent from the flange thickness. The residual stress magnitude and the width of stress area indicated the k area as a vulnerable area to the initial crack occurrence, which may decrease the link performance. Making a welding gap 4 to 5 times of the flange thickness between the stiffeners and the flange may increase the link performance because it may minimize the residual stress magnitude and distribution.

Keywords: K Area, Residual stress, Link, Neutron diffraction, Eccentrically Braced steel Frame Structure (EBFS).

1. Pendahuluan

Struktur Rangka Baja Berpengaku Eksentrik (SRBE) adalah salah satu struktur portal penahan gempa yang telah digunakan lebih dari 20 tahun yang lalu hingga saat ini terutama di negara Amerika Serikat dan Eropa. Struktur ini terbukti memiliki kinerja yang baik sebagai penahan gaya lateral seperti gempa. Namun sangat sedikit sistem ini diaplikasikan di Indonesia meskipun telah diadopsi dalam peraturan gempa Indonesia. Padahal ketersediaan material melalui industri baja nasional menjadi salah satu peluang pengembangan sistem ini di Indonesia.

Kinerja *link* dari SRBE sangat ditentukan oleh parameter kekuatan, kekakuan, daktilitas dan energi disipasi saat gempa terjadi. Kinerja *link* diukur melalui kapasitas rotasi inelastik yang dapat dicapai sebagaimana diatur dalam ketentuan AISC 341-10 (American Institute of Steel Construction, 2010). Penelitian peningkatan kinerja *link* telah banyak dilakukan mulai dari penambahan pengaku badan untuk mencegah terjadi bukling (Kasai dan Popov, 1986), tipe sambungan antara *link* dengan kolom (Okazaki dkk, 2005), *link* yang dapat digantikan (Moestopo dkk, 2008), jarak pengaku badan serta pola pembebanan (Kasai dan Popov, 1986; Richards dan Uang, 2005), penambahan pengaku diagonal (Yurisman, dkk, 2010; Kurdi, dkk, 2013) dan *link built up* (Moestopo dan Panjaitan, 2012).

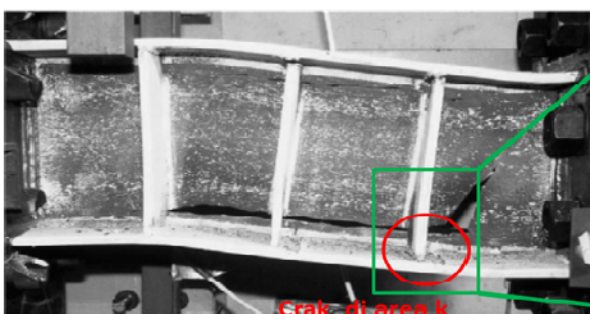
Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya kinerja sebuah *link* tergantung pada beberapa parameter yang signifikan antara lain: parameter penampang yang mencakup nilai kelangsingan sayap dan badan, parameter pengaku badan mencakup ketebalan pengaku dan jarak pengaku. AISC 341-10 telah mengatur tentang penggunaan pengaku badan pada *link*, pengaturan tersebut mencakup: pengaturan jarak pengaku, ketebalan pengaku, daerah "k" dan hubungannya dengan panjang *link*. Ketentuan tersebut diadopsi dari hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan di Universitas California Berkeley (Hjelmstad dan Popov 1983, Malley dan Popov 1984, Kasai dan Popov 1986, Engelhardt dan Popov 1992), yang masih berlaku hingga sekarang.

Selanjutnya fenomena retak (*crack*) pada elemen *link* terjadi di daerah badan maupun sayap. Retak di daerah "k" yang merupakan pertemuan antara pengaku vertikal, badan dan sayap maupun *failure* yang terjadi di badan di dekat pengaku atau dikenal dengan daerah *Heat Affected Zone* (HAZ) tidak hanya dialami oleh *link* menengah (*intermediate*) dan panjang (*flexure*) tetapi juga terjadi pada *link* pendek (*shear link*). Fenomena ini dapat dilihat sebagaimana **Gambar 1**.

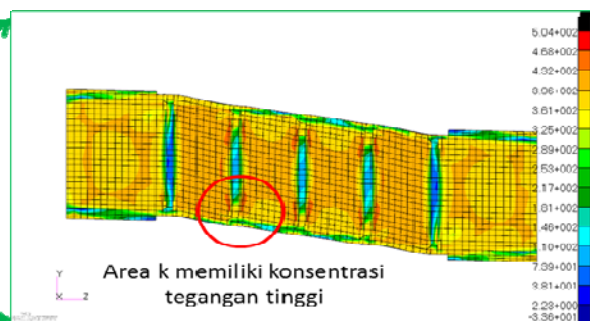
Indikasi awal baik secara numerik maupun eksperimental menunjukkan bahwa fenomena ini disebabkan salah satunya oleh tegangan sisa (*residual stress*) dari pengelasan dimana menimbulkan efek tegangan hidrostatik di daerah HAZ yang menyebabkan terjadinya kegagalan (*fracture*). Fenomena ini menyebabkan kapasitas rotasi inelastik dari elemen *link* sebagaimana yang disyaratkan dalam AISC 341-10 sebesar 0,08 rad untuk *link* pendek tidak dapat dicapai.

Besaran dan distribusi tegangan sisa elemen *link* pada SRBE belum secara mendalam diteliti oleh peneliti-peneliti sebelumnya, penelitian lebih banyak difokuskan pada sambungan T (Lee dkk, 2012; Peric dkk, 2013), sambungan antar pelat (Park dkk, 2004) maupun sambungan pipa dengan pipa (Acevedo dkk 2012). Sehingga penelitian ini difokuskan untuk mengkaji besaran dan distribusi tegangan sisa akibat proses pengelasan di daerah k yang menyebabkan awal timbul *crack*.

Beberapa teknik yang ada untuk mengevaluasi tegangan sisa seperti *sectioning*, *layer removal*, *hole-drilling*, *X-Ray* dan lain-lain memiliki keterbatasan dalam kedalaman pengukuran dan atau sebagian metode merupakan metode destruktif. Penelitian ini menggunakan metode tak merusak dengan teknik hamburan neutron. Karena tidak bermuatan listrik, neutron dapat berinteraksi dengan inti atom-atom penyusun bahan dan mudah menembus bahan sampai beberapa centimeter. dengan sifat unik inilah dimungkinkannya pengukuran arah tegangan sisa sesuai dengan yang dikehendaki. Beberapa peneliti telah menggunakan metode ini untuk pengukuran tegangan sisa (Webster 1992; Park dkk, 2004; Kim dkk 2009; Suzuki dkk, 2011; Acevedo dkk, 2012).



a. Eksperimental (Okazaki, dkk., 2005)



b. Numerik (Kurdi, dkk., 2014)

Gambar 1. Fenomena failure di dan sekitar daerah k dari link

2. Perhitungan Nilai *Residual Stress*

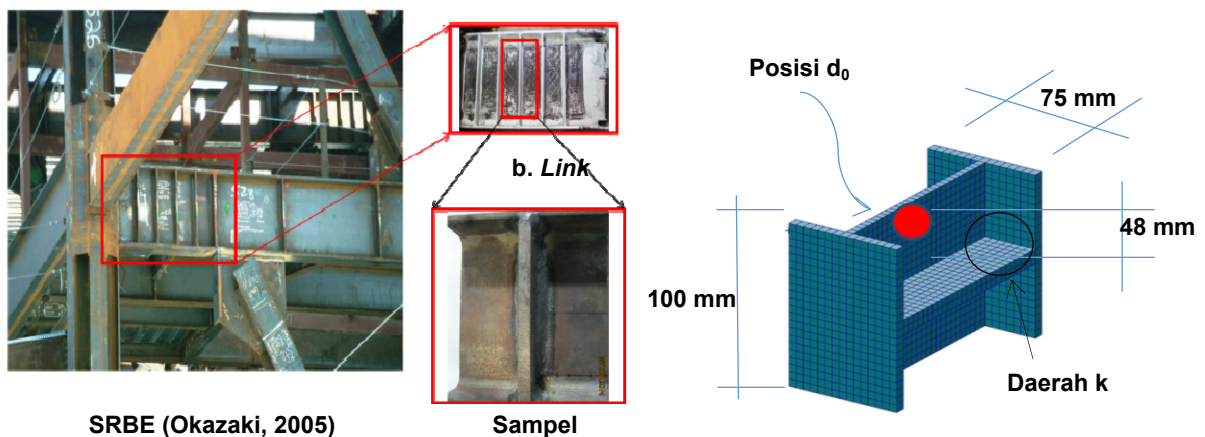
Metode difraksi neutron dapat digunakan secara langsung untuk mengukur regangan (*strain*) dengan mengukur jarak kisi kristal. Nilai tegangan dapat dihitung dalam 3 arah menggunakan **Persamaan (1)**. Penjelasan detail dasar teori dapat dilihat pada Kurdi, dkk (2014).

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

3. Kajian Eksperimental

3.1 Spesifikasi dari sampel

Penelitian secara eksperimental untuk mengetahui karakteristik tegangan sisa akibat proses pengelasan di “daerah k” dari elemen *link* pada Struktur Rangka Baja Berpengaku Eksentrik (SRBE). Proses pengambilan sampel dan geometri dari benda uji dapat dilihat pada **Gambar 1**.



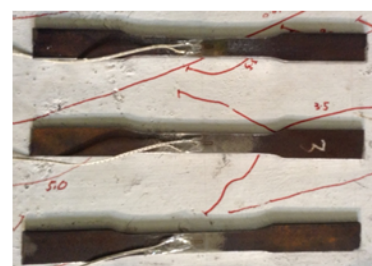
Gambar 2. Pengambilan sampel pengukuran dan dimensi dari sampel

Tabel 1. Data properties material

| Spesimen | Tegangan Leleh, f_y (Mpa) | Tegangan <i>Ultimate</i> , f_u (Mpa) | Perpanjangan (mm) |
|----------|-----------------------------|--|-------------------|
| Sayap | 315 | 490 | 20 |
| Badan | 318 | 497 | 20 |



a. Alat uji tarik



b. Sampel yang akan diuji tarik

Gambar 3. Pengujian tarik dari sampel

Daerah k merupakan daerah pertemuan (*joint*) antara pengaku (*stiffener*) dengan *web* dan *flange*. Sampel yang diukur diambil dari elemen *link* geser dengan panjang 100 mm. Pada tengah sampel diberikan pengaku di kedua sisi *web*. Daerah k diambil dengan luas 10 x 10 mm. Profil yang digunakan adalah Profil WF150.75.5.7. Selanjutnya untuk sampel awal yang merupakan sampel sebelum dilakukan proses pengelasan atau dinamakan dengan sampel d_0 digunakan sebagai referensi dan lokasi pengukuran diambil di lokasi yang sama dengan sampel yang akan dilas.

3.2 Pengujian tarik

Sebelum dilakukan pengukuran terhadap benda uji, terlebih dahulu dilakukan uji tarik baja (*coupon test*) untuk mengetahui karakteristik material baja yang digunakan pada benda uji. Sampel uji tarik diambil pada lokasi yang sama di 3 lokasi yang direncanakan akan dilakukan pengukuran. Satu sampel diambil di tengah *web* dan dua sampel yang lain diambil di

daerah k pada bagian atas dan bawah dari sayap profil. Adapun alat pengujian dan sampel yang diuji sebagaimana **Gambar 2**. Hasil pengujian sebagaimana **Tabel 1**.

3.3 Proses pengelasan

Dalam penelitian ini, pengelasan *fillet* sebagaimana diatur dalam AISC 341-10 dibuat antara pelat pengaku berukuran 136x34 mm dengan ketebalan 10 mm dengan *web* dan *flange*. Prosedur pengelasan mengacu kepada American Welding Society (2008). Sebelum proses pengelasan dimulai, permukaan dari pelat pengaku dan profil dibersihkan dari kotoran dan debu. Untuk menghindari distorsi saat proses pengelasan maka profil yang dilas ditopang dengan pelat lain pada kedua ujung pelat profil. Pengelasan diawali dengan pengelasan titik untuk menempatkan posisi pelat pengaku pada posisi tengah dari *web/flange* yang akan dilas. Proses pengelasan dilakukan dengan tangan dengan tahapan pengelasan dimulai antara pengaku dengan *web* selanjutnya pengaku dengan *flange* yang dilakukan searah jarum jam. Cara yang sama dilakukan untuk bagian sisi yang lain.

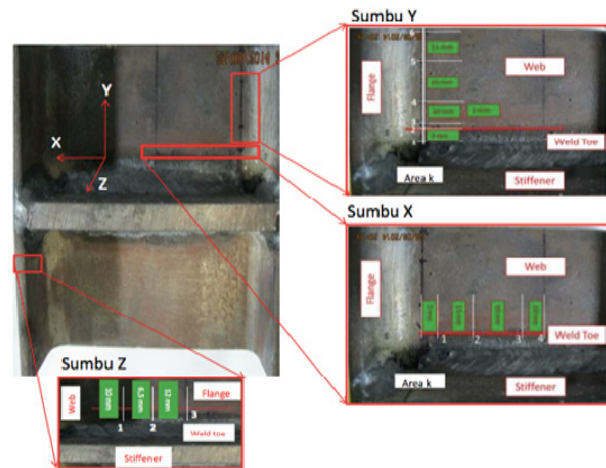
Metode las yang digunakan adalah *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dengan parameter pengelasan yang digunakan antara lain arus las 200 Ampere dan tegangan 10 Volt. Waktu las diukur menggunakan *stopwatch*, dimana panjang pengelasan antara pengaku dan *web* adalah 116 mm selama 59 detik dan pengelasan pengaku dengan *flange* dengan panjang pengelasan 30 mm selama 22 detik.

3.4 Set up dan kalibrasi dari alat

Pengukuran tegangan sisa dilakukan menggunakan alat Diffraktometer Neutron DN1-M PSTBM BATAN yang terpasang pada tabung berkas neutron nomor 6 (S-6) di Reaktor Serbaguna GA Siwabessy (RSG GAS) Serpong. Sebelum pengukuran dilakukan posisi

perletakan meja sampel dikalibrasi kelurusannya terhadap *incident* dan *diffracted beam* baik secara manual maupun menggunakan hamburan neutron. Setelah itu dilanjutkan dengan pengaturan sudut difraksi (2θ) dan perletakan sampel yang akan diuji diatur sesuai dengan posisi/koordinat dari meja sampel.

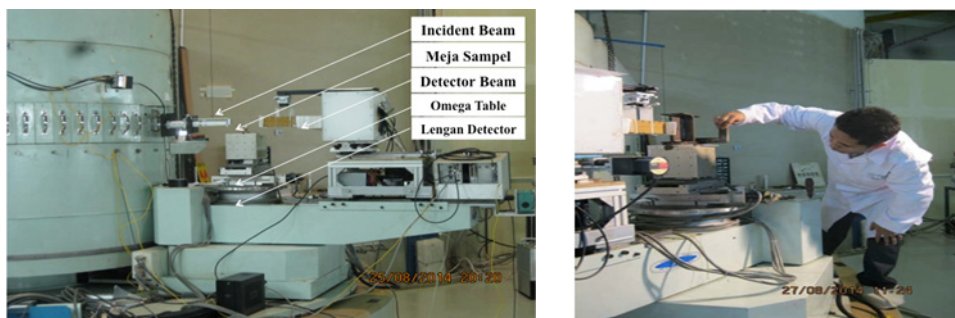
Panjang gelombang neutron yang dipergunakan dalam eksperimen ini sebesar 0,1836864 nm dengan kalibrator *Standard Reference Materials Nikel Silicon* serbuk 640d buatan *National Institute of Standards and Technology* (NIST). Pembatasan daerah pengukuran dilakukan dengan menggunakan celah 3x3 mm² pada sisi berkas neutron datang dan kolimator radial 3 mm pada sisi detektor. Selanjutnya sampel diatur sedemikian rupa sehingga arah pengukuran tegangan sisanya sejajar dengan vektor hamburan dari neutron. Sedangkan untuk mencapai titik pengukuran, meja sampel dilengkapi dengan penggerak dalam arah X-Y-Z. Masing-masing titik pengukuran dilakukan selama 60 menit untuk arah normal dan 90 menit untuk arah transversal maupun longitudinal. Adapun gambaran alat sebagaimana **Gambar 3** dan **Tabel 2** parameter pengukuran yang digunakan.



Gambar 5. Lokasi titik pengukuran

Tabel 2. Nilai parameter yang digunakan dalam eksperimental dari alat Difraktometer PSTBM BATAN

| λ (Å) | 2θ (°) | θ (°) | A(Å) | d | Indeks miller (hkl) | Waktu satu titik | Slit incident Beam | Slit detector |
|---------------|---------------|--------------|------|------|---------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| 1,836863 | 103 | 51,5 | 2,87 | 1,15 | 211 | 90 menit | 3x3 mm | Radial kolimator 7 |



Gambar 4. Diffraktometer neutron untuk pengukuran tegangan sisa

3.5 Lokasi dan arah pengukuran

Untuk kesamaan istilah, pada metode difraksi neutron masing-masing titik pengukuran dapat diukur dalam 3 arah dan dalam penelitian ini dinamakan arah normal, transversal dan longitudinal. Sedangkan untuk lokasi titik dinamakan arah x, y dan z. Pengukuran dilakukan dalam arah normal, transversal dan longitudinal searah dengan pengelasan antara pengaku dengan badan 5 mm dari *weld toe* dan tegak lurus dengan pengelasan antara pengaku dengan sayap sejauh 10 mm sebagaimana ditunjukkan dalam **Gambar 4**.

Sebanyak 15 titik dengan 45 arah pengukuran baik arah transversal, longitudinal maupun normal dilakukan pengukuran dimana sebanyak 5 titik diukur dalam arah x dengan jarak masing-masing 5 mm, 15 mm, 20 mm dan 10 mm dari titik 1 yang merupakan ujung daerah k dari *web*. Selanjutnya 5 titik diukur dalam arah y dengan masing-masing jarak 5, 2, 10 dan 20 mm dan dalam arah Z sebanyak 3 titik dengan jarak 6,5 dan 12 mm. Pengukuran dilakukan pada tengah-tengah dari ketebalan dari *web* atau *flange*. Masing-masing titik diukur dalam arah normal, transversal maupun longitudinal dengan arah pengukuran sebagaimana **Gambar 5**.

4. Hasil Eksperimen dan Pembahasan

Menggunakan **Persamaan 1** serta nilai E_{211} diambil sebesar $2 \cdot 10^6$ Mpa dan ν_{211} sebesar 0,3 maka diperoleh tegangan sisa sebagaimana **Tabel 3**.

5. Pengukuran Dalam Arah Sumbu X

5.1 Besaran dan distribusi tegangan sisa arah transversal

Berdasarkan **Tabel 3** selanjutnya dibuat grafik hubungan antara tegangan sisa dengan posisi dari ujung

pengelasan *web* sebagaimana **Gambar 6**. Tegangan sisa tarik dalam arah transversal sangat tinggi di sekitar daerah k dan berubah menjadi tegangan sisa tekan seiring dengan semakin menjauh dari daerah k atau tegak lurus dari *weld toe* pengelasan antara pengaku dengan *flange*.

Nilai tegangan sisa tarik terbesar diperoleh di titik 1 pada **Gambar 8** sebesar 170,28 Mpa atau sebesar 53,55 % dari tegangan leleh (f_y). Nilai ini mengecil menjadi 71,06 Mpa pada posisi 10 mm searah dengan pengelasan antara pengaku dengan *web* (titik 2). Dan meningkat hampir 10 Mpa pada titik 3 atau sebesar 81,89 Mpa pada posisi 25 mm dari *weld toe* sayap (titik 3). Pada jarak 35 mm dari titik 1 nilai tegangan sisa menjadi tegangan sisa tekan dengan nilai 18,35 Mpa dan 60,9 Mpa untuk masing-masing di titik 4 dan 5.

Besarnya nilai tegangan sisa tarik yang dihasilkan di sekitar daerah k pada gambar 10 kemungkinan disebabkan oleh tiga hal antara lain pertama, pengaruh dari geometri yaitu selain pengaruh ketebalan pengelasan antara pengaku (10 mm) dengan *flange* (7 mm) juga pengaruh ketebalan pengelasan antara pengaku dengan *web* (5 mm). Penyebab kedua adalah pengaruh luasan daerah k khususnya panjang daerah k pada posisi *web* searah pengelasan antara pengaku dengan badan. Dalam AISC 341-10 disyaratkan bahwa lebar lubang daerah pengelasan adalah 38 mm, pada pengujian ini lebar daerah pengelasan adalah 10 mm atau dua kali dari tebal *web* (t_w). Pengaruh ketiga disebabkan oleh tahapan proses pengelasan di sekitar daerah k. Pengelasan pertama dilakukan antara pengaku dengan *web* dan pengelasan kedua dilakukan antara pengaku dengan *flange*.

Gambar 10 juga memperlihatkan daerah tarik yang cukup lebar yaitu 35 mm atau sekitar 0,46 kali nilai lebar sayap (b_f), dengan kata lain lebarnya sama dengan 7 kali dari tebal *web* (t_w). Lebarnya daerah tarik ini

Tabel 3. Nilai tegangan *residual stress* dalam arah normal, transversal dan longitudinal

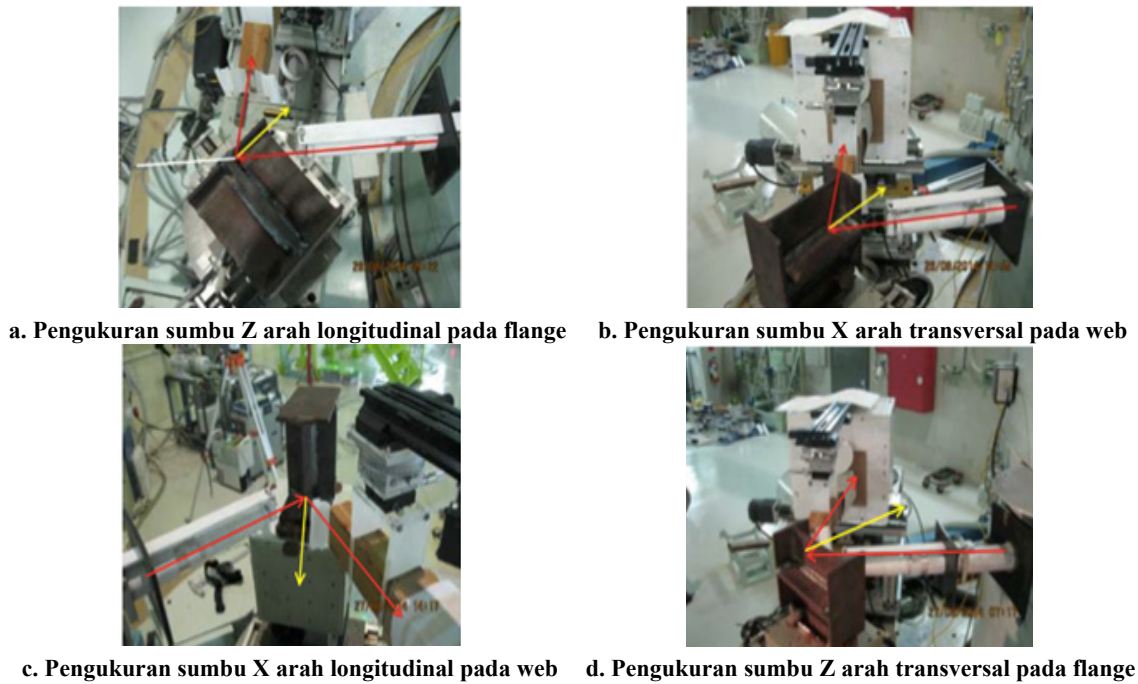
| Titik Pengukuran | Posisi (mm) | Arah Normal | | Arah Transversal | | Arah Longitudinal | |
|------------------|-------------|----------------|--------------|------------------|--------------|-------------------|--------------|
| | | Strain (mikro) | Stress (Mpa) | Strain (mikro) | Stress (Mpa) | Strain (mikro) | Stress (Mpa) |
| Posisi Sumbu X | | | | | | | |
| X1 | 5 | (555,92) | (15,64) | 652,60 | 170,28 | 508,97 | 148,19 |
| X2 | 10 | (638,37) | (102,54) | 490,04 | 71,06 | 110,83 | 12,72 |
| X3 | 25 | (404,48) | (45,24) | 421,85 | 81,89 | 129,87 | 36,97 |
| X4 | 45 | (420,04) | (96,51) | 87,98 | (18,35) | 55,74 | (23,31) |
| X5 | 55 | (430,69) | (117,01) | (65,99) | (60,90) | 56,87 | (42,00) |
| Posisi Sumbu Y | | | | | | | |
| Y1 | 5 | (555,92) | (15,64) | 652,60 | 170,28 | 508,97 | 148,19 |
| Y2 | 10 | (478,41) | (116,83) | 434,34 | 23,59 | (330,61) | (94,10) |
| Y3 | 12 | (345,42) | (125,26) | 338,91 | (19,97) | (618,48) | (167,26) |
| Y4 | 22 | (99,12) | (61,82) | 142,06 | (24,71) | (446,52) | (115,26) |
| Y5 | 42 | 157,98 | (5,26) | (145,35) | (51,93) | (268,88) | (70,93) |
| Y6 | 53 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Posisi Sumbu Z | | | | | | | |
| Z1 | 10 | 173,78 | 9,18 | 66,94 | (7,26) | (392,90) | (78,01) |
| Z2 | 16,5 | 194,57 | 46,67 | (73,09) | 5,49 | 23,53 | 20,35 |
| Z3 | 28,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

menyebabkan daerah k rawan terjadinya iniasi *crack*. Lebar area tarik yang dihasilkan pada daerah k disebabkan panas yang tidak seragam akibat tahapan pengelasan yang dilakukan antara pengaku dengan *web* dan pengaku dengan *flange* sehingga menyebabkan proses pendinginan yang tidak seragam.

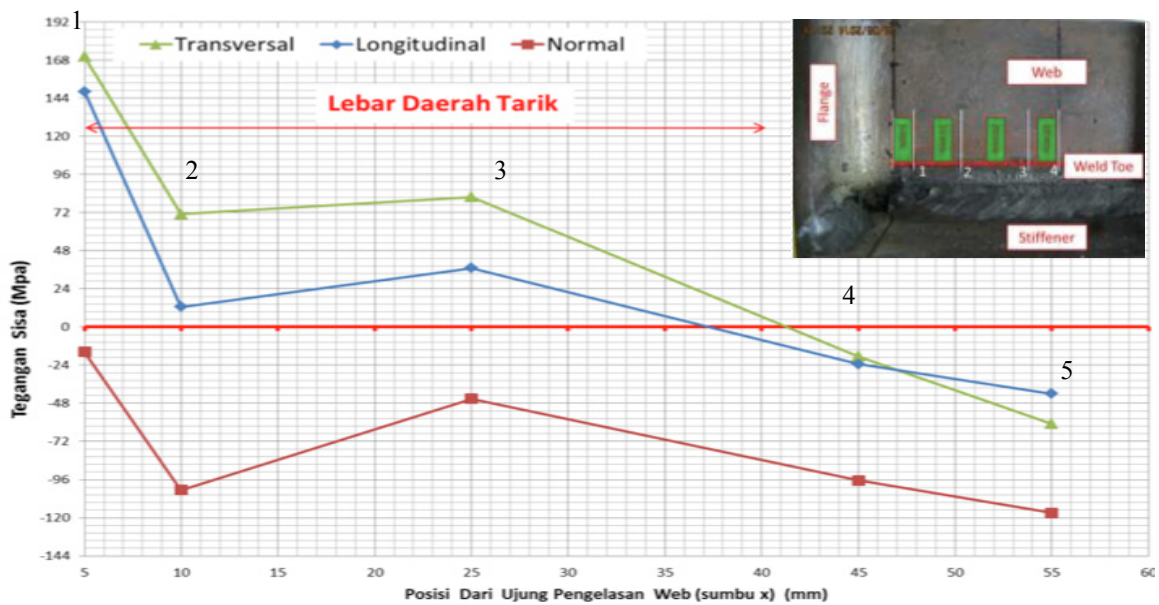
Ini menjelaskan mengapa *failure* dari *link* terjadi disekitar daerah k yang mempunyai tegangan sisa tarik yang tinggi dan lebar daerah tarik yang luas sebagaimana pengujian yang dilakukan oleh Moestopo dan Panjaitan (2012) pada **Gambar 7a**. Perilaku kegagalan *link* juga mendekati dengan perilaku pemodelan

secara numerik sebagaimana **Gambar 7b** dimana terjadi konsentrasi regangan plastis yang tinggi pada daerah pengaku dengan badan. Untuk kajian numerik tidak dibahas dalam paper ini.

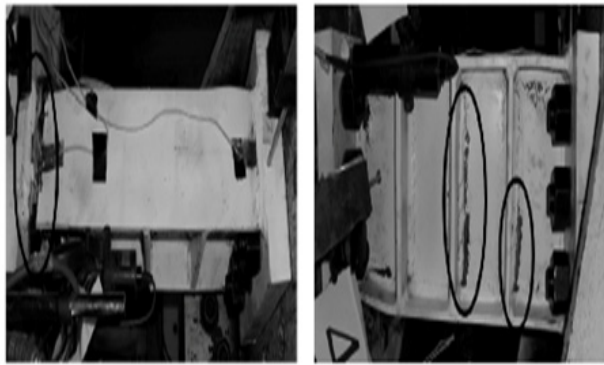
Memperlebar daerah k menjadi salah satu cara meminimalkan cepatnya proses *crack* yang terjadi disekitar daerah k. Memperlebar daerah k akan menyebabkan pengurangan besaran tegangan tarik dan mempersempit lebar daerah tarik. Nilai yang diberikan oleh AISC 341-10 perlu disesuaikan kembali dengan memperhatikan rasio pengelasan pengaku dengan *web* dan *flange* serta rasio lebar dan tinggi dari profil yang



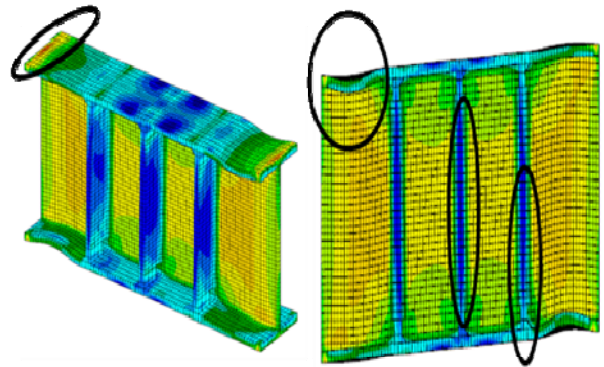
Gambar 6. Arah pengukuran sampel



Gambar 7. Kurva residual stress dalam arah Sumbu X



a. Eksperimen (Moestopo dan Panjaitan, 2012)



b. Numerik (Kurdi, dkk., 2014)

Gambar 8. Perilaku *failure* pada elemen *link* sepanjang daerah pengelasan

mempengaruhi besaran dan distribusi tegangan sisa di daerah k. Dalam penelitian ini disarankan lebar daerah k adalah 4 sampai dengan 5 kali dari lebar *web* untuk lebar *flens* kecil dari 0,5 kali tinggi profil ($b_f = 0.5d$) dan rasio antara pengaku dengan ketebalan *web* kecil dari 3.

5.2 Besaran dan distribusi tegangan sisa arah longitudinal

Berdasarkan Gambar 6 dan Tabel 3 terlihat pola yang mirip dari besaran dan distribusi tegangan sisa antara pengukuran arah transversal maupun longitudinal. Nilai tegangan sisa yang dihasilkan berupa tegangan sisa tarik yang cukup besar pada titik 1 yaitu 148,19 Mpa. Nilai ini turun sekitar 13 % dari nilai tegangan tarik pada arah transversal. Nilai tegangan sisa turun seiring dengan pertambahan jarak dari *weld toe* sayap. Untuk posisi 5 mm nilai tegangan sisa tarik sebesar 12 Mpa dan sedikit meningkat sebagaimana pola pada tegangan pengukuran arah transversal yaitu sebesar 36 Mpa pada posisi 25 mm dari *weld toe* (titik 3). Selanjutnya tegangan sisa menjadi tekan dengan nilai 23,31 Mpa pada titik 4 dan pada titik 5 dengan nilai 52,35 Mpa.

Lebar daerah tarik untuk pengukuran dalam arah longitudinal juga mendekati lebar yang sama dengan pengukuran dalam pengukuran arah transversal. Hal ini menjelaskan perilaku *crack* dari pengujian Okazaki (2005) sebagaimana Gambar 1a. Dimana iniasi *crack* terjadi di daerah k dan berkembang dengan cepat searah longitudinal penampang akibat dikenai beban siklik yang menyebabkan tegangan tarik menjadi bertambah.

Dari besaran dan distribusi yang dihasilkan di daerah k pada pengukuran arah transversal maupun longitudinal memperlihatkan bahwa *crack* yang terjadi pada elemen *link* dapat menurunkan kinerja *link* karena link tidak dapat berdeformasi besar disebabkan terjadinya *crack* yang berkembang cepat ke bagian lain sehingga kinerja link tidak dapat tercapai terutama syarat kapisata inelastic sesuai AISC 341-10 tidak terpenuhi.

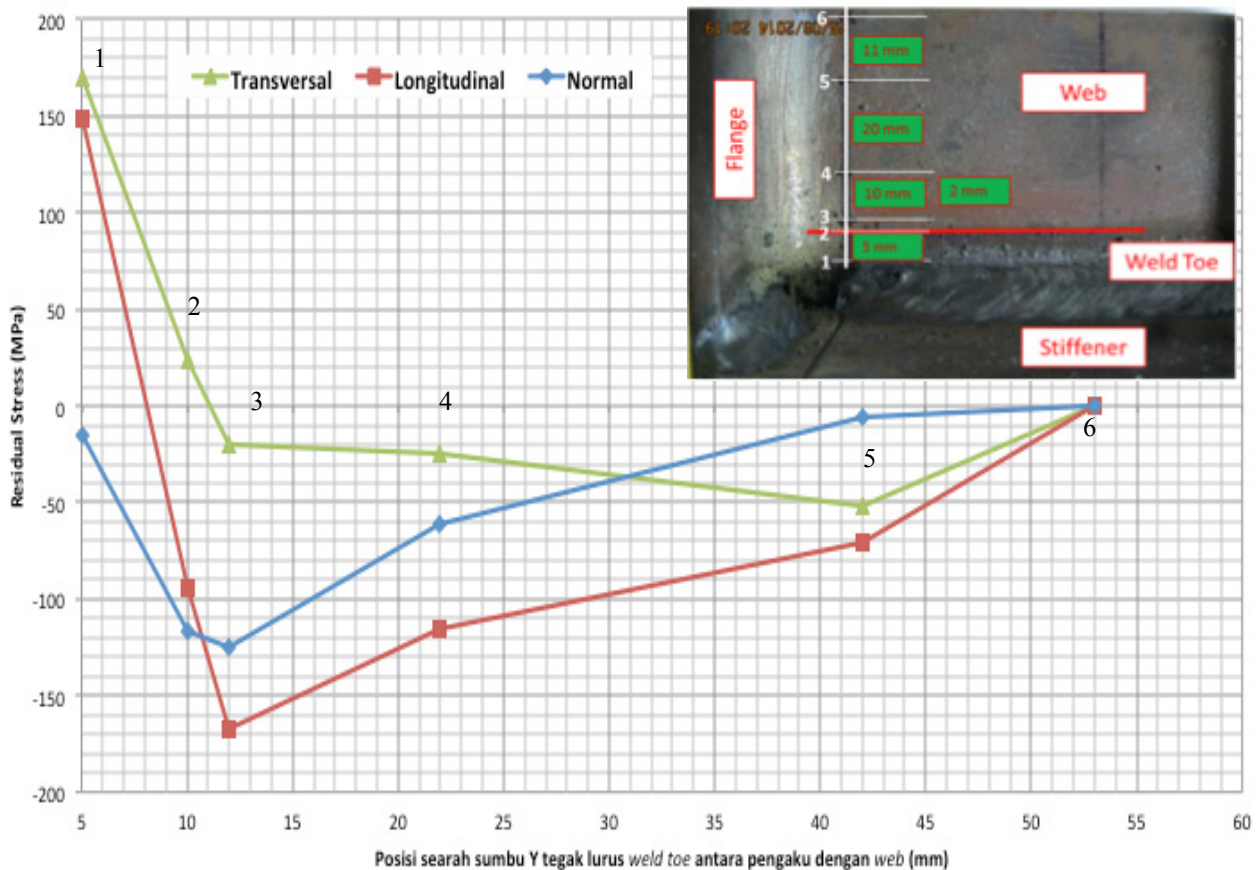
5.3 Besaran dan distribusi tegangan sisa arah normal

Pola besaran dan distribusi tegangan sisa dalam arah normal menunjukkan trend yang hampir sama dengan arah transversal maupun longitudinal. Perbedaan yang sangat kontras dimana nilai tegangan yang dihasilkan berupa tegangan tekan untuk kelima titik pengukuran. Hal ini berbeda dengan arah transversal maupun longitudinal yang menghasilkan tegangan tarik maupun tekan. Nilai tegangan sisa tekan adalah 15,64; 102,54; 45,24 ; 96,51 dan 76,57 Mpa untuk masing-masing pengukuran pada titik 1, 2, 3, 4 dan 5. Karena nilai yang dihasilkan merupakan nilai tegangan sisa tekan sehingga tidak merugikan melainkan memberikan keuntungan untuk mengurangi pengaruh *crack* di daerah k.

6. Pengukuran Dalam Arah Sumbu Y

Besaran dan distribusi tegangan sisa dalam arah y memiliki daerah tarik maupun tekan, kecuali untuk tegangan sisa dalam arah normal semuanya tekan. Pola distribusi tegangan sisa antara arah transversal maupun longitudinal mirip dengan nilai tegangan sisa tarik mencapai 170 dan 148 Mpa untuk masing-masing arah sebagaimana Gambar 8.

Lebar daerah tarik yang dihasilkan hampir setengah kali daerah tarik untuk pengukuran dalam arah x baik untuk tegangan sisa dalam arah transversal maupun longitudinal. Selanjutnya lebar daerah tarik longitudinal lebih kecil setengah kali dari lebar daerah tarik transversal. Hal ini disebabkan oleh pengaruh dari proses pengelasan antara pengaku dengan *web* yang *overlap* dengan pengelasan pengaku dengan sayap. Nilai tegangan sisa terbesar diperoleh pada titik 1 daerah sejauh 5 mm dari *weld toe* pengelasan sayap dengan nilai 170 Mpa dan 148 Mpa untuk arah longitudinal.



Gambar 9. Kurva residual stress dalam arah Sumbu Y

Penyebab besaran dan distribusi tegangan sisa yang dihasilkan sama seperti pengukuran dalam arah x, perbedaan yang nyata adalah nilai panas dan proses pendinginan yang berbeda tergantung dari panjang pengelasan. Nilai tegangan sisa longitudinal semakin kecil dengan semakin jauh jarak pengelasan dari *weld toe* web begitu juga dengan nilai tegangan sisa transversal yang cenderung turun seiring dengan semakin jauh jarak pengelasan dari *weld toe* sayap.

7. Pengukuran Dalam Arah Sumbu Z

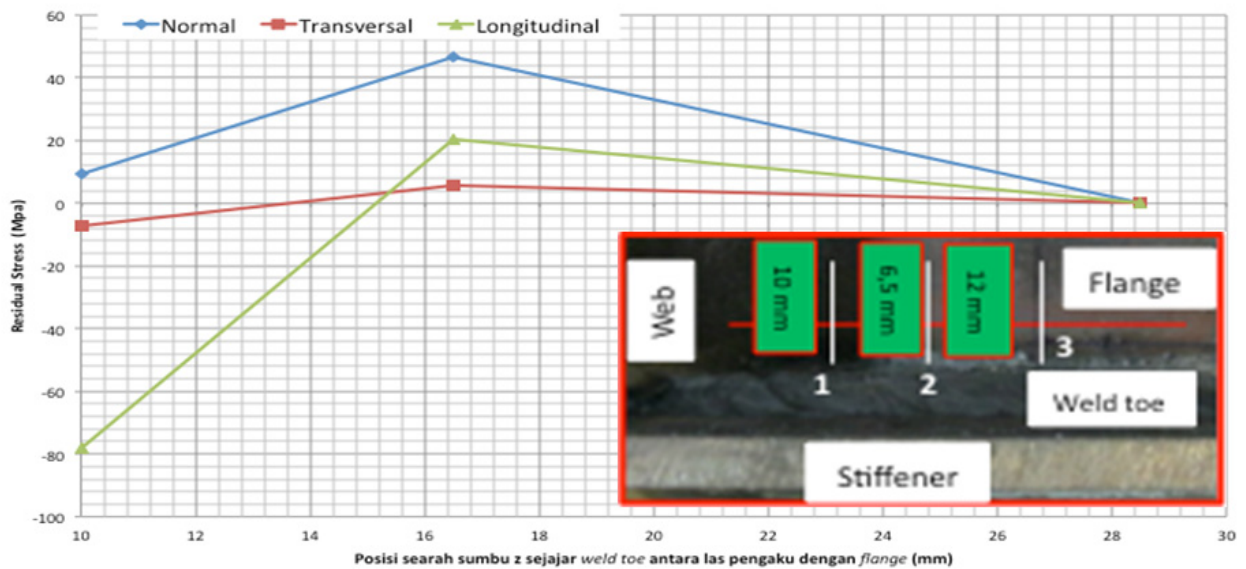
Besaran dan distribusi tegangan sisa dalam arah z memiliki daerah tarik maupun tekan, kecuali untuk tegangan sisa dalam arah normal semuanya tekan sebagaimana Gambar 9. Nilai tegangan sisa dalam arah transversal cukup kecil cenderung mendekati nol sehingga dapat diabaikan. Tegangan sisa tarik yang dihasilkan cukup kecil (40 Mpa) dalam arah longitudinal sehingga juga dapat diabaikan terhadap pengaruh iniasi *crack*. Untuk arah normal tegangan sisa tekan dihasilkan dua kali dari tegangan tarik transversal. Melihat besaran dan distribusi tegangan sisa yang dihasilkan pada sayap maka pengaruh yang menyebabkan *crack* sangat kecil sehingga nilai tegangan sisa pada *flange* dapat diabaikan. Nilai tegangan sisa longitudinal semakin kecil dengan semakin jauh jarak

pengelasan dari *weld toe* pada *web* begitu juga dengan nilai tegangan sisa transversal yang cenderung turun seiring dengan semakin jauh jarak pengelasan dari *weld toe* sayap.

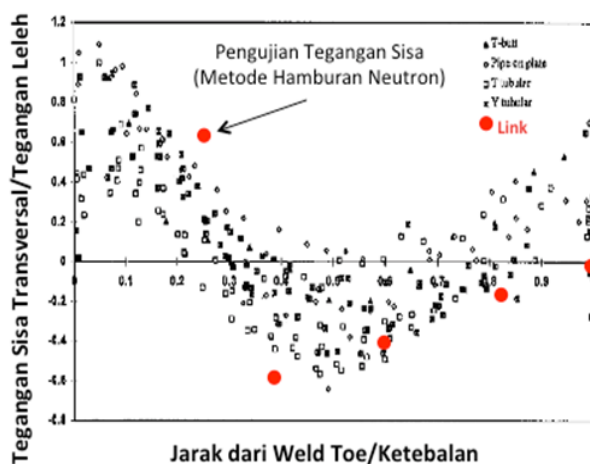
8. Perbandingan dengan Pengukuran Eksperimental Lainnya

Peneliti juga melakukan perbandingan hasil pengukuran dari peneliti lainnya yang diambil dari laporan Bate dan Green (1997). Empat jenis pengujian antara lain sambungan antar pelat, sumpungan pelat dengan pipa, sambungan pipa dengan pipa dan sambungan pelat berbentuk T yang didapat dari hasil pengujian dengan metode *sectioning* dan *drilling* diplot dalam grafik yang sama dengan hasil pengujian yang dilakukan peneliti menggunakan metode difraksi neutron sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10.

Dari grafik terlihat pola distribusi yang sama untuk pengujian dengan difraksi neutron dibandingkan dengan empat jenis pengujian lainnya. Perbedaan yang jelas terlihat dari besaran dan lebar daerah tarik dari tegangan sisa yang dihasilkan. Perbedaan ini disebabkan posisi titik pengukuran yang dilakukan di internal penampang tepatnya di tengah *web/flange* sedangkan penelitian lain diukur pada permukaan penampang.



10. Kurva residual stress dalam arah Sumbu Z



Gambar 11. Perbandingan hasil eksperimen peneliti terdahulu dengan pengukuran residual stress pada link

9. Kesimpulan

Dari hasil pengukuran yang dilakukan menggunakan metode difraksi neutron maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Besaran dan distribusi tegangan sisa pada elemen *link* dapat diukur secara akurat menggunakan metode difraksi neutron tanpa harus merusak sampel. Pola dan distribusi tegangan sisa yang dihasilkan sama dengan peneliti terdahulu sedangkan besaran ditentukan oleh lokasi titik pengukuran.
2. Hasil pengukuran diperoleh pola besaran dan distribusi tegangan sisa yang mirip antara arah transversal maupun longitudinal. Tegangan sisa tarik yang tinggi diperoleh disekitar daerah k dekat

weld toe pengelasan antara pengaku-*web-flange* dengan nilai 170 Mpa untuk arah transversal dan 140 Mpa arah longitudinal. Tingginya nilai tegangan sisa tarik serta lebar daerah tarik yang dihasilkan mencapai tujuh kali dari tebal *web* mengindikasikan bahwa daerah k rawan terjadinya *failure* berupa *crack* yang dapat menurunkan kinerja dari *link*.

3. Memperlebar daerah k menjadi salah satu cara meminimalkan cepatnya proses *crack* yang terjadi disekitar daerah k. Memperlebar daerah k akan menyebabkan pengurangan besaran tegangan tarik dan mempersempit lebar daerah tarik.

Ucapan Terima Kasih

Peneliti mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada LPPM ITB serta Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi yang telah membiayai penelitian ini melalui program Riset Desentralisasi dan ucapan 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 Dr. Sutiarso, M.Sc selaku Kepala Bidang Teknologi Berkas Neutron yang telah banyak memberikan bantuan, saran dan izinnya dalam penggunaan alat DN1-M serta terima kasih yang tak terhingga penulis ucapkan kepada Prof. Ir. Adang Surahman, M.Sc, Ph.D yang telah memberikan masukan saat diskusi mengenai besaran dan distribusi tegangan sisa.

Daftar Pustaka

- Acevedo, C., Drezet, J.M., Lefebvre, J.P., D'Avise, L., dan Nussbaumer, A., 2012, *Residual Stresses in As-Welded Joints: Finite Element Modeling and Neutron Diffraction Stress Measurements*, Switzerland: Key Engineering Materials, Vol. 488-489, pp. 335-338.
- American Welding Society (AWS), 2008, *Structural Welding Code-Steel (AWS D1.1)*, Miami, US.
- American Institute of Steel Construction, 2010, *Seismic Provision for Structural Steel Buildings*, AISC, Inc.
- Bate, S.K., dan Green, D., 1997, *A Review of Residual Stress Distributions in Welded Joints for Defect Assessment of Offshore Structures*, Norwich: SE Books.
- 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, pp. 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, pp. 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, pp. 362-382, February, ASCE.
- Kim, S.H., Kim, J.B., dan Lee, W.J., 2009, Numerical Prediction and Neutron Diffraction Measurement of Residual stresses For a Modified 9Cr-1Mo Steel Weld, *Journal of Material Processing Technology*, pp. 3905-3913.
- Kurdi, Budiono, B., dan Yurisman, 2013, Studi Numerik Usulan Jarak Pengaku Badan Diagonal Link Geser pada Struktur Baja Eccentrically Braced Frame Type-D, *Jurnal Teknik Sipil ITB*, Vol.20, No.2, Agustus.
- Kurdi, Budiono, B., dan Yurisman, 2013, *Studi Numerik Peningkatan Kinerja Struktur Baja Eccentrically Braced Frame Type-D Dengan Modifikasi Pengaku Badan Link Geser*, Konferensi Nasional Teknik Sipil 7 (KoNTekS7), Solo, 24-26 Oktober.
- Kurdi, Budiono, B., Moestopo, M dan Yurisman, 2013, *Peningkatan Kinerja Struktur Rangka Baja Berpengaku Eksentrik (SRBE) dengan Konfigurasi Pengaku Link*, Konferensi Nasional Pascasarjana Teknik Sipil, Bandung, 21 November.
- 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.
- Lee, C.K., Chiew, S.P., dan Jiang, J., 2012, *Residual Stress Study of Welded High Strength Steel Plate-to-Plate Joints, Part 1: Experimental Study*, Thin-Walled Struct, 56, pp. 103-12.
- 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., Kusumastuti, D., dan Novan, A., 2008, *Improved Performance of Bolt-Connected Link Due to Cyclic Load*, Jakarta, International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation.
- 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.
- Okazaki, T., Arce, G., Ryu, H.C., dan Engelhardt, M.D., 2005, Experimental Study of Local Buckling, Over Strength, and Fracture of Links in Eccentrically Braced Frames, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, pp. 1526-1535.
- Park, M.J., Yang, H.N., Jang, D.Y., Kim, J.S., dan Jin, T.E., 2004, Residual Stress Measurement on Welded Specimen by Neutron Diffraction, *Journal of Material Processing Technology*, pp. 155-156.
- Peric, M., Tonkovic, Z., Rodic, A., Surjak, M., Garašić, I., Boras, I., dan Švaic, S., 2013, *Numerical Analysis and Experimental Investigation of Welding Residual Stresses and Distortions in a T-joint Fillet Weld*, Materials and Design, 53, pp. 1052-1063.
- Richards, P.W., dan Uang, C.M., 2005, Effect of Flange Width-Thickness Ratio on Eccentrically Braced Frames Link Cyclic Rotation Capacity, *Journal Structure Engineering, ASCE*, pp. 1546-1552.

Suzuki, T., Oikawa, H., Imafuku, M., Suzuki, H., Sugiyama, M., Nose, T., Tomota, Y., dan Moriai, A., 2011, *Residual stress Measurement of Welding Area by Neutron Diffraction Methode*, Nippon Steel Technical Reports.

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.

Webster, P.J., 1992, *Spatial Resolution and Strain Scanning. Measurement of Residual and Applied Stresses using Neutron Diffraction* (Eds. Hutchings, M.T. and Krawitz, A.D.), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 235-251.

