

---

**KORELASI ANTARA ARUS PENGELASAN  
DENGAN TEGANGAN SISA PADA SAMBUNGAN LAS  
TUTUP–KELONGSONG ELEMEN BAKAR NUKLIR ZIRCALOY-2**

Futichah\* dan Rifa'i Muslich\*\*

\*Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN, Serpong

\*\*Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir – BATAN, Serpong

**ABSTRAK**

**KORELASI ANTARA ARUS PENGELASAN DENGAN TEGANGAN SISA PADA SAMBUNGAN LAS TUTUP–KELONGSONG ELEMEN BAKAR NUKLIR ZIRCALOY-2.** Perlakuan panas yang tidak merata pada pengelasan selama fabrikasi elemen bakar PWR dapat meninggalkan tegangan sisa dalam bahan kelongsong. Salah satu upaya untuk mengurangi tegangan sisa adalah dengan mengurangi panas yang diterima bahan yang dilas sampai batas yang diperbolehkan melalui pengaturan parameter-parameter las TIG yaitu arus dan lama pengelasan. Selanjutnya pada cuplikan perlu dicari korelasi antara arus dan lama pengelasan terhadap nilai tegangan sisa. Hal ini dilakukan dengan menggunakan alat difraktometer neutron untuk mempelajari pengaruh arus dan lama pengelasan terhadap nilai tegangan sisa pada hasil las tutup–kelongsong Zry-2. Hasil penelitian menunjukkan bahwa distribusi tegangan sisa untuk cuplikan dengan besar arus dan lama pengelasan 53/2, 52/3, 51/3, dan 50/3 ampere/menit adalah yang optimum karena mempunyai nilai tegangan sisa tarik dan tekan yang rendah serta perbedaannya terkecil yaitu 20 MPa. Sedangkan korelasi antara parameter las terhadap nilai tegangan sisa adalah  $\sigma = 102,501 + 0,0095 I^2$  untuk arah radial dan  $\sigma = 271,1264 + 0,0571 I^2$  untuk arah *hoop*.

**KATA KUNCI:** Arus las, Waktu las, TIG, Tegangan sisa, Kelongsong Zry-2

**ABSTRACT**

**CORRELATION BETWEEN WELD CURRENT AND RESIDUAL STRESS ON CLADDING–END CAP WELD JOINT OF ZIRCALOY-2 NUCLEAR FUEL ELEMENT.** The inhomogeneous thermal treatment of welding upon the fabrication of PWR fuel element can create residual stress in cladding material. One method to decrease the residual stress is by reducing the heat received by the welded material up to the allowed limit through the adjustment of TIG weld parameters such as weld current and time. Furthermore, the correlation between weld current and time on the residual stress in the samples must be determined. This is carried out using neutron diffraction to examine the influence of weld current on the residual stress on Zry-2 cladding–end cap. The results show that the residual stress distribution for samples with weld current and time of 53/2, 52/3, 51/3, and 50/3 ampere/minute is optimum because the values of the tensile and compression residual stresses are low and the difference between the two is the smallest, which is 20 MPa. The correlations between weld parameter and residual stress are  $\sigma = 102,501 + 0,0095 I^2$  for radial direction and  $\sigma = 271, 1264 + 0,0571 I^2$  for hoop direction.

**FREE TERMS:** Weld current, Weld time, TIG, Residual stress, Zry-2 cladding

## I. PENDAHULUAN

Pengelasan TIG (*Tungsten Inert Gas Welding*) tanpa logam pengisi atau *filler*, dipersyaratkan untuk mengelas pelat yang sangat tipis. Pengelasan TIG tanpa logam pengisi juga biasa digunakan untuk mengelas kelongsong dan tutup ujung elemen bakar nuklir. Kelongsong elemen bakar nuklir berupa *tubing* Zircaloy-2 (Zry-2) dengan ketebalan dinding kurang dari 2 mm<sup>[1,2,3,4]</sup>. Untuk menjaga kededapan elemen bakar nuklir, kelongsong perlu ditutup dengan tutup ujung (*end caps*) dengan cara dilas.

Parameter las TIG tanpa logam pengisi untuk pengelasan tutup–kelongsong tersebut antara lain: kemurnian gas pelindung, arus dan waktu las, kecepatan putar, geometri elektrode serta jarak antara elektrode dan benda kerja. Parameter ini berpengaruh terhadap kualitas hasil las. Spesifikasi umum hasil las tutup–kelongsong Zry-2 yang dipersyaratkan adalah<sup>[4]</sup>:

1. Tingkat kebocoran hasil las : <10 mbar/det.
2. Kedalaman las : > tebal nominal dinding kelongsong.
3. Porositas : diameter <0,3 mm, tanpa inklusi dan tanpa retak.
4. Ketahanan korosi : sebelum dan sesudah uji korosi tidak terjadi perubahan warna menjadi putih kecuali warna kehitaman (lapisan pasivasi).
5. Kekuatan : > kekuatan tarik kelongsong.
6. Ukuran las : maksimum diameter kelongsong yang ditetapkan.
7. Keseragaman penampakan : tanpa ada lubang (kawah), pori-pori, dan retakan.

Banyak pustaka yang membahas masalah pengaruh parameter las TIG terhadap mikrostruktur, porositas, keseragaman ukuran las, kekuatan, ketangguhan, dan daya tahan terhadap kebocoran serta korosi hasil las tutup–kelongsong Zry-2<sup>[5,6,7,8]</sup>. Semua ini bermuara pada pengujian kualitas hasil las yang dipersyaratkan. Pustaka lain menyatakan bahwa tegangan sisa kemungkinan juga bisa muncul pada hasil las<sup>[1,2,9]</sup>. Tegangan sisa akan mengurangi umur pakai bahan karena akan memicu atau mempercepat timbulnya korosi tegangan pada bahan. Kemungkinan ini juga bisa terjadi pada hasil las tutup–kelongsong elemen bakar nuklir. Untuk meningkatkan ketahanan korosi, dengan kata lain apabila tegangan sisa dikurangi atau dihilangkan, maka ketahanan korosi pada hasil las kelongsong dan tutup ujung akan meningkat.

Tegangan sisa pada hasil las muncul karena adanya penyusutan pada waktu pendinginan setelah pengelasan<sup>[1]</sup>. Semakin besar volum penyusutan, maka akan semakin besar pula tegangan sisanya. Salah satu upaya untuk mengurangi tegangan sisa adalah mengurangi volum pelelehan logam sampai batas minimum yang diijinkan dengan cara mengurangi masukan panas las<sup>[1,2]</sup>. Pengurangan masukan panas (H) dilakukan adalah dengan cara mengatur parameter las yaitu arus (I) dan waktu (t) las.

$$H = VIt \quad \text{atau} \quad H_1 = I^2 Rt \quad (1)$$

Masukan panas las ( $H_1$ ) digunakan untuk menaikkan suhu dan proses pelelehan bahan yang dilas. Sedangkan panas yang dikeluarkan ( $H_2$ ) digunakan untuk proses pembekuan dan penurunan suhu saat pendinginan. Selisih antara masukan dan keluaran panas ( $H_1 - H_2$ ) merupakan energi yang tersimpan dalam bahan. Energi yang tersimpan tersebut berupa energi dilatasi atau regangan mikro ( $\epsilon_i$ )<sub>termal</sub>.

$$H_1 - H_2 = \Delta H \quad (2)$$

$$(mC\Delta T_1 + m\lambda) - (mC\Delta T_2 + m\lambda) = \Delta H \quad (3)$$

pelelehan                      pembekuan

$$\Delta T = \frac{\Delta H}{mC} \quad (4)$$

Besarnya  $\Delta T$  tergantung pada  $\Delta H$ . Untuk pendinginan alami,  $\Delta H$  tergantung pula pada besarnya panas yang diberikan ( $H_1 = I^2 R t$ ). Sementara itu  $\Delta H$  yang tersimpan dalam bahan diubah menjadi energi regangan mikro ( $\varepsilon_i$ )<sub>termal</sub><sup>[2]</sup>:

$$(\varepsilon_i)_{\text{termal}} = \alpha \Delta T \quad (6)$$

dimana m = massa  
C = kapasitas panas spesifik  
 $\lambda$  = panas peleburan  
 $\varepsilon$  = regangan mikro  
 $\alpha$  = koefisien muai panjang.

Sesuai dengan Hukum Hooke<sup>[13]</sup>, regangan mikro berkaitan dengan tegangan sisa ( $\sigma$ ) dalam bahan.

$$\sigma_x = \frac{E}{(1 + \nu(1 - 2\nu))} \{ (1 - \nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z) \} \quad (7)$$

Oleh karena itu, dengan menurunkan panas las sampai batas tertentu maka tegangan sisa yang terbentuk akan menurun pula. Berdasarkan fenomena tersebut, dapat dirumuskan hipotesis bahwa pengaturan parameter proses yang mengarah pada pengurangan panas las sampai dengan batas tertentu dapat mengurangi tegangan sisa.

Untuk menjawab hipotesis di atas, dilakukan penelitian sejauh mana pengaruh arus dan lama pengelasan terhadap nilai tegangan sisa pada hasil las tutup-kelongsong Zry-2.

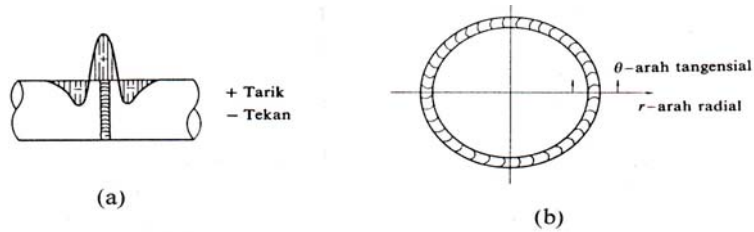
## II. TEORI

### 2.1 Tegangan Sisa Las

Tegangan sisa adalah gaya elastis yang dapat mengubah jarak antar atom dalam bahan tanpa adanya beban dari luar. Tegangan sisa ditimbulkan karena adanya deformasi plastis yang tidak seragam dalam suatu bahan, antara lain akibat perlakuan panas yang tidak merata atau perbedaan laju pendinginan pada bahan yang mengalami proses pengelasan<sup>[2,9]</sup>. Adanya tegangan sisa dalam suatu bahan kemungkinan dapat menguntungkan atau malah merugikan tergantung pada fungsi bahan, besar, dan arah tegangan sisa. Walaupun tegangan sisa secara visual tidak nampak, namun sesungguhnya tegangan sisa tersebut juga bertindak sebagai beban yang tetap yang akan menambah nilai beban kerja yang diberikan dari luar<sup>[2,9]</sup>.

Dalam proses pengelasan, bagian yang dilas menerima panas pengelasan setempat dan selama pemanasan berjalan terjadi pengembangan termal dan pelelehan logam. Pada saat proses pengelasan dihentikan, mulai terjadi proses selanjutnya yaitu proses pembekuan (solidifikasi). Proses ini merupakan awal terbentuknya tegangan sisa karena terjadinya proses pembekuan diikuti adanya penyusutan volum bahan. Penyusutan volum bahan menyebabkan terjadinya regangan. Regangan pada bahan akan menyebabkan terjadinya tegangan yang sifatnya tetap dan disebut tegangan sisa<sup>[1]</sup>.

Las melingkar pada pipa akan menimbulkan tegangan tarik arah memanjang di sekitar garis las dan tegangan tekan pada arah yang sedikit lebih jauh lagi dari garis las serta seimbang antara satu dengan lainnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1<sup>[1]</sup>.

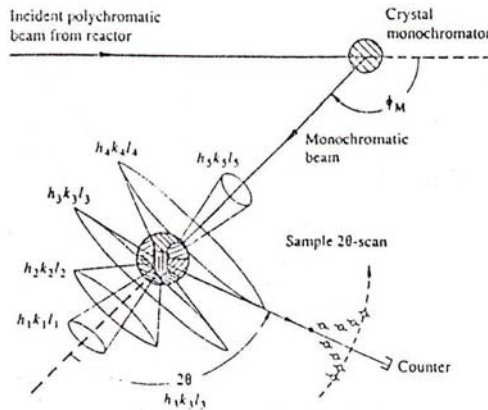


Gambar 1. Distribusi tegangan sisa untuk penampang lintang las melingkar pada pipa<sup>[1]</sup>

Distribusi tegangan sisa tergantung dari jenis dan bentuk lasan, Gambar 1(a) dan 1(b) adalah jenis lasan tumpul dengan bentuk las *Single V-groove butt joint*. Untuk mengetahui besar dan distribusi tegangan sisa dapat dilakukan pengukuran melalui metode uji tak merusak, salah satu metode tersebut adalah difraksi neutron. Metode ini dipilih dengan alasan adanya keuntungan atau kelebihan yang diperoleh, antara lain dapat menentukan tensor tegangan dalam arah tiga dimensi, dan daya penetrasi lebih tinggi ( $>100 \mu\text{m}$ ) bahkan sampai 2,5 cm untuk bahan tahan karat (SS) dan 7 cm untuk aluminium. Pada perkembangan selanjutnya untuk Al daya penetrasi dapat mencapai 15 cm<sup>[9]</sup>. Dengan demikian, tegangan sisa yang terukur tidak hanya tegangan yang ada di permukaan bahan saja, melainkan lebih jauh sampai ke dalam bahan.

## 2.2. Pengukuran Tegangan Sisa dengan Difraksi Neutron

Neutron cepat dari hasil reaksi fisi dalam reaktor nuklir dimoderasi untuk menghasilkan neutron dengan energi yang lebih rendah (kinetik) melalui tumbukan yang berulang dengan atom-atom moderator seperti grafit, air atau air berat. Neutron tersebut berada dalam keseimbangan termis dengan moderator dan akan mengikuti hukum distribusi Maxwell-Boltzman. Neutron ini dinamakan neutron termal. Apabila suhu moderator 40 °C, maka panjang gelombangnya  $\lambda = 1,1 \text{ \AA}$ . Panjang gelombang ini cocok untuk penelitian struktur maupun dinamika kristal karena jarak antar atom dalam kristal sekitar 1 Å. Selanjutnya neutron dilewatkan kolimator serta kristal monokromator untuk menghasilkan berkas neutron monokromatis yang paralel, dengan panjang gelombang tertentu ( $\lambda = 1,827 095 \text{ \AA}$ ). Berkas neutron monokromatis ini diarahkan ke material polikristalin dan didifraksi dengan sudut tertentu membentuk kerucut Debye-Scherrer series seperti tampak pada Gambar 2<sup>[10]</sup>. Masing-masing kerucut difraksi berkaitan dengan jarak antar bidang atom (d), dan masing-masing kerucut difraksi ditangkap oleh detektor. Posisi puncak maksimum dari hasil pencacahan merupakan indeks Miller (hkl) bidang seperti yang diberikan oleh persamaan Bragg<sup>[10]</sup>.



Gambar 2. Kerucut hamburan Debye-Scherrer dari material polikristalin yang dikenai berkas neutron monokromatis<sup>[10]</sup>

Pengukuran tegangan sisa di dalam bahan menggunakan difraksi neutron tidak dapat dilakukan secara langsung, melainkan ditentukan melalui regangannya. Dengan menggunakan persamaan atau hubungan antara tegangan-regangan elastis dan menyertakan modulus Young dan perbandingan Poisson, maka akan diperoleh nilai tegangan sisa yang terbentuk dalam bahan tersebut. Besar regangan internal diperoleh dengan melakukan pengukuran untuk menentukan jarak antar bidang kisi cuplikan standar  $d_0$  yang diperoleh dari sudut hamburan difraksi  $\theta_0$  dengan asumsi bebas tegangan, kemudian pengukuran pergeseran puncak Bragg  $\Delta\theta$  yang timbul karena ada perubahan  $\Delta d$  akibat adanya tegangan sisa. Selanjutnya harga regangan dapat ditentukan menggunakan persamaan yang diperoleh dari diferensial persamaan Bragg berikut:

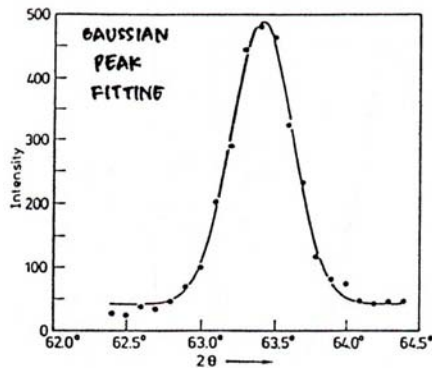
$$\lambda = 2 d_{hkl} \cdot \sin \theta_{hkl} \tag{8}$$

dimana  $\lambda$  adalah panjang gelombang neutron monokromatis, sehingga persamaan regangan  $\epsilon$  menjadi:

$$\epsilon = \frac{\Delta d}{d_0} = -\cot \theta_0 \cdot \Delta \theta \tag{9}$$

$$\epsilon = \frac{(d - d_0)}{d_0} = -\cot \theta_0 (\theta - \theta_0) \tag{10}^{[7,8]}$$

dimana  $d_0$  dan  $d$  adalah jarak antar bidang kisi dari cuplikan awal yang bebas tegangan dan cuplikan yang mengandung tegangan, sedangkan  $\theta_0$  dan  $\theta$  adalah sudut difraksi pada cuplikan awal bebas tegangan dan cuplikan yang diukur tegangannya. Penentuan posisi puncak dari pola difraksi didekati dengan fungsi matematis distribusi Gaussian (Gauss-Cauchy)<sup>[11]</sup> seperti pada Gambar 3.



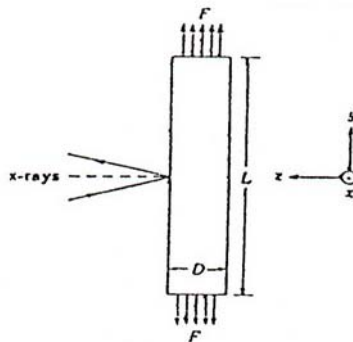
Gambar 3. Metode penentuan  $2\theta$  puncak dengan fungsi Gauss-Cauchy<sup>[11]</sup>

### 2.3 Hubungan antara Tegangan-Regangan Elastis

Pada tegangan satu sumbu (uniaksial) seperti terlihat pada Gambar 4, tegangan terjadi hanya pada satu sumbu (sumbu y) dengan  $\sigma_y = F/A$ . Tegangan dalam arah x dan z sama dengan nol. Tegangan  $\sigma_y$  menghasilkan regangan dalam arah y.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} = \frac{L - L_o}{L_o} \quad (11)$$

dimana  $L$  = panjang akhir batang  
 $L_o$  = panjang awal batang.



Gambar 4. Difraksi pada tegangan satu sumbu (uniaksial)<sup>[12]</sup>

Menurut hukum Hooke,

$$\sigma_y = E\varepsilon_y \quad (12)$$

regangan dalam arah x dan z adalah :

$$\varepsilon_x = \varepsilon_z = \frac{D - D_o}{D_o} \quad (13)$$

dimana  $D$  = diameter akhir batang  
 $D_o$  = diameter awal batang.

Bila material isotropis, maka:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_z = -\nu \cdot \varepsilon_y = (-\nu \cdot \sigma_y) / E \quad (14)$$

dimana  $\nu$  = perbandingan Poisson dari material.

Pada difraksi neutron, yang dapat diukur adalah jarak antar bidang atom yang arahnya tegak lurus permukaan. Dengan demikian yang dapat terukur adalah  $\varepsilon_x$  dan  $\varepsilon_z$ , yaitu :

$$\varepsilon_x = \varepsilon_z = \frac{d - d_o}{d_o} \quad (15)$$

dimana  $d$  = jarak antar bidang atom yang ada tegangan  
 $d_o$  = jarak antar bidang atom yang bebas tegangan.

Substitusi persamaan (14) ke dalam persamaan (15) diperoleh :

$$\sigma_y = -\frac{E}{\nu} \left[ \frac{d - d_o}{d_o} \right] \quad (16)$$

dimana harga  $d$  dan  $d_o$  dapat dicari dengan hukum Bragg.

Pada tegangan tiga sumbu X, Y dan Z, regangan utamanya adalah  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ , dan  $\varepsilon_z$  dan tegangan utamanya adalah  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ , dan  $\sigma_z$ . Sesuai dengan hukum Hooke<sup>[13]</sup> maka tegangan sisa dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\sigma_x = \frac{E}{(1 + \nu(1 - 2\nu))} \{ (1 - \nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z) \} \quad (17)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1 + \nu(1 - 2\nu))} \{ (1 - \nu)\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_z) \} \quad (18)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1 + \nu(1 - 2\nu))} \{ (1 - \nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y) \} \quad (19)$$

### III. TATA KERJA

Untuk membuktikan hipotesis yang diajukan, sebagai perlakuan dalam penelitian ini adalah besar arus dan lama pengelasan. Sedangkan efek yang diamati adalah distribusi tegangan sisa dengan alat difraksi neutron. Data yang diperoleh diharapkan dapat membuktikan hipotesis tersebut dan dapat menentukan parameter optimum untuk pengelasan tutup-kelongsong Zry-2 dalam fabrikasi elemen bakar nuklir.

#### 3.1 Penyiapan Cuplikan

Cuplikan yang digunakan adalah hasil proses las tutup-kelongsong Zry-2 sebanyak 7 buah (sudah termasuk cuplikan standar) yaitu P0, P1, P2, P3, P4, P5, dan P6 dengan ukuran diameter luar 13,23 mm dan diameter dalam kelongsong 12,23 mm, dan dipotong dengan panjang 70 mm.

Tutup ujung kelongsong adalah tabung pejal Zry-2 dengan diameter 13,23 mm dan dipotong dengan ukuran panjang 10 mm, Ujung tutup yang akan masuk ke kelongsong dibubut dengan sudut kemiringan ujung yang sama untuk semua cuplikan yakni sebesar 10°. Pada posisi hasil pemotongan dan pembubutan kelongsong dan tutup selanjutnya dilakukan gerinda atau dihaluskan untuk menghilangkan serpihan yang masih menempel. Kemudian cuplikan dicuci dan dikeringkan untuk menghilangkan kotoran dan lemak. Langkah terakhir adalah pada

cuplikan yang sudah bersih dilakukan pengelasan dengan arus dan lama pengelasan (besaran skala) seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

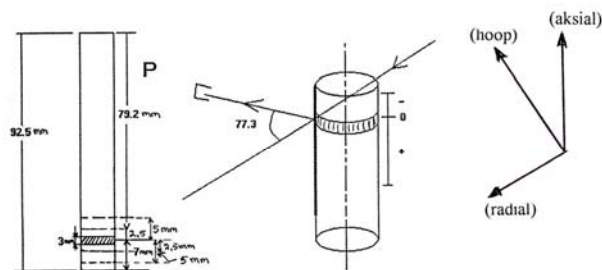
Tabel 1. Kondisi besar arus dan waktu pengelasan

Kode cuplikan	Tingkat arus dan waktu pengelasan								RPM
	Tingkat I		Tingkat II		Tingkat III		Tingkat IV		
	ampere	detik	ampere	detik	ampere	detik	ampere	detik	
P1	47	2	46	3	45	3	44	3	7,5
P2	49	2	48	3	47	3	46	3	7,5
P3	51	2	50	3	49	3	48	3	7,5
P4	53	2	52	3	51	3	50	3	7,5
P5	55	2	54	3	53	3	52	3	7,5
P6	57	2	56	3	55	3	54	3	7,5

Pengaturan tingkat arus/waktu pengelasan dilakukan dengan mensest panel kendali arus/waktu yang ada pada mesin las TIG tersebut untuk masing-masing tingkat. Sebagai contoh, untuk pola arus/waktu cuplikan P1 pengaturannya adalah sebagai berikut: Tingkat I = 47 ampere selama 2 menit, Tingkat II = 46 ampere selama 3 menit, Tingkat III = 45 ampere selama 3 menit, dan Tingkat IV = 44 ampere selama 3 menit. Parameter las yang lain dibuat konstan, yaitu bentuk ujung elektrode adalah lancip, jarak *torch* elektrode ke benda kerja (cuplikan) adalah 0,25 mm, dan gas pelindung proses pengelasan adalah argon serta kecepatan putar (RPM) = 7,5. Harga modulus elastisitas atau modulus Young dan perbandingan Poisson dari cuplikan masing-masing adalah  $E = 99\,300\text{ MPa}$  dan  $\nu = 0,37^{[4]}$ .

### 3.2 Kondisi Pengukuran

Untuk pengukuran regangan cuplikan Zry-2 dalam penelitian ini, dilakukan pengukuran sudut hamburan bidang piramidal heksagonal (1013) yaitu posisi di sekitar sudut  $2\theta = 77,3^\circ$  pada arah X, Y, dan Z. Penentuan posisi puncak dari pola difraksi didekati dengan fungsi matematis distribusi Gaussian (Gauss-Cauchy). Pengukuran cuplikan dilakukan pada posisi di tengah las (posisi 0) dan posisi  $\pm 2,5\text{ mm}$  dan posisi  $\pm 5\text{ mm}$  dari titik tengah las seperti tampak pada Gambar 5.



Gambar 5. Geometri cuplikan las tutup–kelongsong Zry-2 dan posisi pengukuran



### 3.3 Metode Pengukuran

Peralatan yang digunakan adalah difraktometer neutron DN1-M milik PTBIN-BATAN yang dipasang pada tabung berkas neutron tangensial S-6 Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy di Serpong. Langkah-langkah pengukuran regangan adalah sebagai berikut:

1. Pengukuran sudut hamburan  $0^\circ$ .
2. Penentuan indeks dan daerah pengukuran.
3. Penentuan ukuran *slit*.
4. Pemasangan cuplikan yang akan diukur regangannya.
5. Penggerakan lengan detektor ke sudut hamburan (indeks pengukuran).
6. Pengukuran *preferred orientation* dari cuplikan yang akan diukur.
7. Pengukuran  $d_0$  pada arah X, Y, dan Z untuk cuplikan tanpa las P0 yang diasumsikan bebas tegangan.
8. Pengukuran  $d$  pada arah X, Y, dan Z untuk cuplikan P1 sampai dengan P6.
9. Analisis regangan dan tegangan.

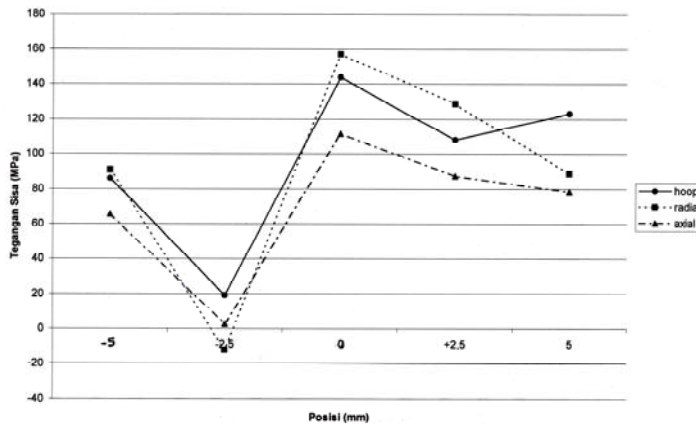
## IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Beberapa hasil pengukuran dan pengolahan data regangan dan tegangan sisa melintang daerah lasan pada arah sumbu X (*hoop*), Y (radial) dan Z (aksial) untuk cuplikan P1 sampai dengan P6, ditunjukkan pada Gambar 6 sampai Gambar 8. Seperti telah dijelaskan yakni pada Gambar 5, bahwa pengukuran dilakukan pada pusat las dan pada jarak 2,5 mm dan 5 mm ke arah atas dan bawah dari pusat las. Distribusi tegangan sisa pada cuplikan P1 sampai dengan P6 mempunyai kecenderungan bentuk kurva yang sama, yaitu di posisi arah ke tutup kelongsong atau  $-2,5$  mm di bawah pusat las tegangannya turun lebih besar dibandingkan dengan penurunan pada posisi  $+2,5$  mm di atas pusat las. Tegangan dari posisi  $-2,5$  mm ke posisi  $-5$  mm juga mengalami kenaikan yang lebih besar dibandingkan dengan tegangan  $+2,5$  mm ke posisi  $+5$  mm. Kenaikan dan penurunan tegangan yang tidak simetris dari sisi atas dan bawah pusat las tersebut, diakibatkan oleh bentuk atau konstruksi cuplikan pada sisi atas dan bawah tidak sama. Pada posisi atas adalah konstruksi bebas, sehingga proses perambatan dilatasi atau ekspansi dari logam yang terkena panas bergerak bebas. Tegangan tarik lebih dominan dibandingkan dengan tegangan tekan karena pada saat proses pendinginan terjadi, kecepatan pengembalian ke posisi semula lebih lambat dibanding dengan kecepatan pendinginannya. Pada posisi cuplikan bagian bawah adalah konstruksi dengan penahan dari tutup kelongsong, sehingga terjadi sebaliknya, yaitu tegangan tekan lebih dominan dibandingkan dengan tegangan tariknya. Oleh karena itu, kurva tegangan terhadap posisi las, tidak sesuai dengan kurva yang mempunyai kecenderungan bentuk kurva gelombang simetris seperti pada Gambar 1.

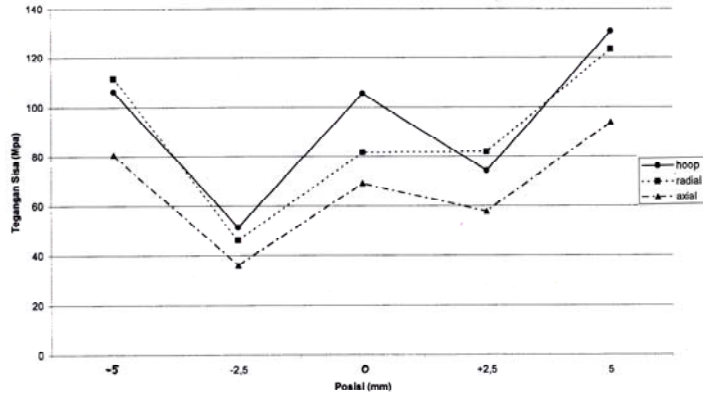
Dari pengolahan statistik diperoleh harga F data jauh lebih besar dibanding harga F yang diperoleh dari tabel, dengan tingkat kepercayaan 99%. Keadaan ini menunjukkan bahwa besar arus pengelasan pada cuplikan P1 sampai dengan P6 berpengaruh terhadap tegangan sisa yang terbentuk pada hasil pengelasan. Sebagai bukti bahwa besar arus dan lama pengelasan berpengaruh terhadap tegangan sisa dapat dilihat pada Gambar 9 atau Tabel 2. Bentuk kurva korelasinya adalah kuadratik dengan persamaan  $\sigma = 271,1264 - 0,0571 I^2$  untuk arah *hoop* dan  $\sigma = 102,501 + 0,0095 I^2$  untuk arah radial. Tegangan sisa pada arah *hoop* menunjukkan bahwa arus pengelasan semakin tinggi, tegangan sisa yang terbentuk semakin menurun. Sedangkan pada arah radial kondisinya menjadi terbalik, yaitu arus semakin meningkat maka tegangan

sisa yang terbentuk semakin meningkat pula. Jadi hipotesis yang diajukan dalam penelitian ini diterima untuk kondisi tegangan sisa pada arah radial, dan ditolak untuk arah *hoop*.

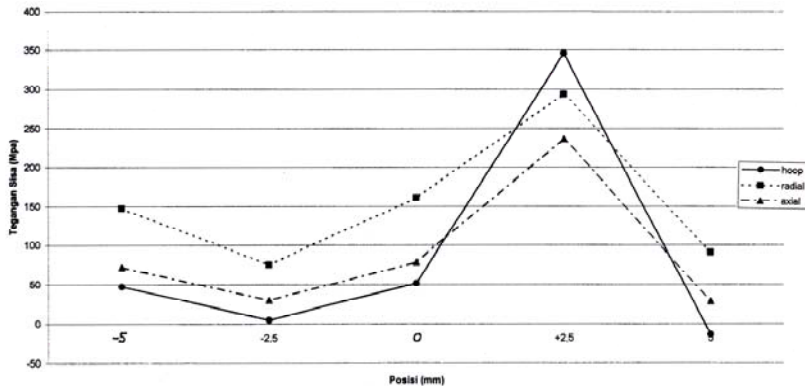
Jika diamati Gambar 6 sampai Gambar 8 pada pola arus dan lama pengelasan cuplikan P1 sampai dengan P6, distribusi tegangan sisa yang terbentuk dan yang paling aman untuk dipilih adalah besar arus dan lama pengelasan untuk cuplikan P4 karena nilai tegangan sisa tarik dan tekan di sekitar las rendah serta mempunyai perbedaan yang terkecil yaitu rata-rata 20 MPa. Disamping itu, pertimbangan pemilihan besar arus dan lama pengelasan pada cuplikan P4 ini dapat pula diperkuat dengan tinjauan terhadap hubungan antara tegangan sisa dan arus las, seperti ditunjukkan pada persamaan dan kurva korelasinya pada Gambar 9. Dengan memasukkan besar arus pada pola arus cuplikan P4 ke persamaan korelasi tersebut, maka diperoleh harga tegangan sisa yang paling optimum, yaitu  $\sigma = 129,19$  MPa untuk arah *hoop* dan  $\sigma = 110,7325$  MPa untuk arah radial.



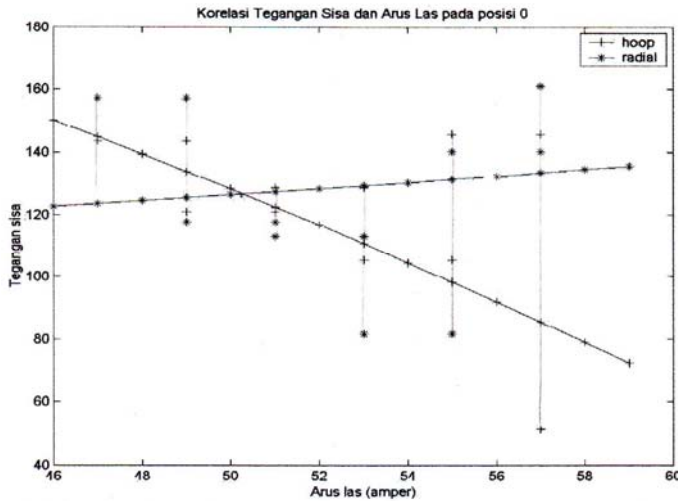
Gambar 6. Distribusi tegangan sisa pada cuplikan las P1 untuk arah *hoop*, radial dan aksial.



Gambar 7. Distribusi tegangan sisa pada cuplikan las P4 untuk arah *hoop*, radial dan aksial.



Gambar 8. Distribusi tegangan sisa pada cuplikan las P6 untuk arah *hoop*, radial dan aksial.



Gambar 9. Grafik korelasi pola arus dan waktu las (P1 sampai dengan P6) terhadap tegangan sisa hasil las, untuk pengukuran pada posisi 0 (pusat las) pada arah *hoop* dan radial. Persamaan korelasinya adalah  $\sigma = 271,1264 - 0,0571 I^2$  untuk arah *hoop* dan  $\sigma = 102,501 + 0,0095 I^2$  untuk arah radial.

Tabel 2. Arus las maksimum dan tegangan sisa pada posisi 0 (pusat las)

Kode cuplikan	Arus las Tingkat I (ampere)	Tegangan sisa, $\sigma$ (MPa)	
		<i>Hoop</i>	Radial
P0	0	0	0
P1	47	143,651 9429	157,115 3164
P2	49	120,856 1818	117,680 7164
P3	51	128,803 0983	112,903 1461
P4	53	105,445 0345	81,644 608 74
P5	55	145,745 6663	140,275 2792
P6	57	51,309 958 87	160,874 35

## V. KESIMPULAN

Dari hasil pembahasan dan analisis tegangan sisa, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Besar arus dan lama pengelasan terbukti berpengaruh terhadap tegangan sisa dan distribusinya. Peningkatan arus las dapat memperbesar nilai tegangan sisa pada arah radial dengan korelasi  $\sigma = 102,501 + 0,0095 I^2$  dan sebaliknya peningkatan arus dapat menurunkan nilai tegangan sisa pada arah hoop dengan korelasi  $\sigma = 271,1264 - 0,0571 I^2$ .
- Besar arus dan lama pengelasan yang paling optimum adalah 53/2, 52/3, 51/3, dan 50/3 karena mempunyai nilai dan perbedaan tegangan sisa tarik dan tekan yang paling kecil.

## VI. UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada Bapak Ir. Wijaksana atas saran dan koreksi yang diberikan hingga karya tulis ini selesai disusun, serta kepada Bapak

Djoko Kisworo (PTBN-BATAN Serpong) dan Bapak Ir. Saeful Hidayat (PTNBR-BATAN Bandung) atas segala bantuan yang diberikan dalam preparasi dan pengelasan cuplikan.

## VII. PUSTAKA

1. HARSONO WIRYOSUMARTO, dan TOSHIE OKUMURA, "Teknologi Pengelasan Logam", Pradnya Paramita, Jakarta, 1991, hal.1-145.
2. De GARMO, E.P., "Materials and Processes in Manufacturing", Collier Macmillan, London, 1984, p.870.
3. CARRY, H.B., "Modern Welding Technology", Prentice Hall, New Jersey, 1979, pp.21-45.
4. TIG Fuel Rod End Plug Welding, Kraftwerk Union, Juklak Las TIG.
5. EFRIZON UMAR, S. HIDAYAT, dan GANDANA, "Optimasi Proses Pengelasan Kelongsong Elemen Bakar Nuklir", Prosiding Seminar Pendayagunaan Reaktor Nuklir untuk Kesejahteraan Masyarakat, Bandung, 1990, hal.394-399.
6. SAEFUL HIDAYAT, EFRIZON UMAR, dan TONY KUSWOYO, "Pengaruh Geometri Ujung Elektroda Terhadap Hasil Pengelasan TIG Tutup Kelongsong Batang Elemen Bakar Nuklir Bahan Zircaloy-4", Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia, Vol.IV, 2 Agustus 2003, hal.151-171.
7. SEJNOHA, and TAYAL, "Performance of End Cap Welds I 37-element CANDU Fuel", INIS 1/1993-2/1996, Canada.
8. KANG, Y.H, RYU, W.S, and RHEEM, K., "Study on Stress Corrosion Cracking of Fuel Cladding Tube", IAEA, INIS 1/1993-2/1996.
9. HUTCHIN, M.T., "Neutron Diffraction Measurement of Residual Stress", NATO ASI Series E, Applied Science, Vol.216, 1991, pp.3-18
10. SMITH, D.J., LEGGATT, R.H., and WEBSTER, G.A., "Neutron Diffraction Measurement of Residual Stress and Plastic Deformation in Aluminium Alloy Weld", Journal of Strain Analysis, Vol.23, No.4, 1988.
11. ISO VAMAS, ISO/TTA 3, "Polycrystalline Materials – Determination of Residual Stresses by Neutron Diffraction", 1<sup>st</sup> ed., 2001.
12. CULLITY, B.D., "Element of X-Ray Diffraction", 2<sup>nd</sup> ed., Addison-Wesley, Indiana, 1978, p.482.
13. DIETER, G.E., "Mechanical Metallurgy", 3<sup>rd</sup> ed., McGraw-Hill, Toronto, 1986, pp.6-52.
14. ASM Handbook, Metals Handbook, Vol.2, Properties and Selection: Nonferrous Alloy and Special-Purpose Material, USA, 1990, p.666.