

MANAJEMEN TEGANGAN SISA UNTUK MEREDUKSI KEGAGALAN SAMBUNGAN LAS REL KERETA API (Residual Stress Management to Reduce Railway Weld Joint Failures)

Yurianto¹, A. Androva², H.Ma'mun³, M.B. Haryono⁴, R. Hermana⁵, Y. Settyohadi⁶, Sri Nugroho⁷

*Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas PGRI Semarang
Gedung Pusat Lantai 3, Kampus 1 Jl. Sidodadi Timur 24, Semarang
Departemen Teknik Mesin, Universitas Diponegoro Semarang²
Jl. Prof. Jacub Rais, Tembalang, Kec. Tembalang, Semarang*

E-mail: yurianto_narimin@yahoo.com

Abstrak

Pemanasan dan pendinginan di akhir proses pengelasan dapat menyebabkan tegangan sisa permanen dan tetap ada pada sambungan las. Studi ini melakukan bertujuan mengelola tegangan sisa pada logam dasar dan zona yang terkena panas dari sambungan rel yang dilas dengan pengelasan busur logam terlindung manual, dan membandingkannya dengan hasil pengelasan termit yang umum digunakan untuk pengelasan rel. Penelitian ini mendukung kelayakan pengelasan untuk rel. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah rel tipe R-54, dan prosedur yang digunakan adalah dua sampel rel sepanjang satu meter masing-masing, dilas menggunakan pengelasan busur logam terlindung manual dan pengelasan termit sebagai pembanding. Logam dasar dan zona yang terkena panas dari sambungan las dipindai dengan difraksi sinar neutron. Pemindaian menghasilkan pola spektrum dan mengungkapkan arah tegangan sisa beserta pola tersebut. Dari penelitian ditemukan nilai regangan yang terkandung dalam kedua jenis sambungan las dengan melihat nilai mikroregangan, dan diperoleh menggunakan persamaan Bragg. Hasil menunjukkan bahwa besaran dan arah tegangan sisa yang dihasilkan oleh pengelasan busur logam terlindung manual dan pengelasan termit tidak sama. Pengelasan termit menghasilkan tegangan sisa lebih rendah dibanding pengelasan busur logam terlindung manual. Hasil tegangan sisa dari pengelasan busur logam terlindung manual dan pengelasan termit masih di bawah kekuatan luluh logam dasar.

Kata kunci: hardness, ketangguhan, regangan, retak, stress.

I. PENDAHULUAN

Salah satu kerusakan pada rel adalah retakan umum yang dimulai dengan retakan kecil. Gradien tegangan sisa menyebabkan kerusakan pada sambungan las antara logam dasar – BM dan zona yang terkena panas – HAZ dan logam las – WM. Salah satu penyebab tegangan ini adalah pemanasan dan pendinginan yang tidak seragam selama dan setelah pengelasan.

Penyambungan dua rel sering dilakukan dengan pengelasan Manual Metal Arc Welding – MMAW (Weman, 2003) dan juga disebut Manual Shielded Metal Arc Welding – MSMAW.

Hasil akhir pengelasan per lapisan meninggalkan tegangan sisa dalam pola dan arah. Pada lapisan pengelasan berikutnya, sebagian dari lapisan pertama meleleh dan

kemudian membeku, menciptakan tegangan sisa baru. Tegangan sisa dari lapisan pertama berubah menjadi tegangan sisa lanjut (lapisan kedua) dan seterusnya, tergantung pada jumlah lapisan yang digunakan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi besaran dan arah tegangan sisa pada sambungan las rel logam dasar dan zona yang terkena panas yang dihasilkan oleh pengelasan busur logam terlindung manual dan pengelasan termit (sebagai pebandingnya).

Adapun tujuan penelitian adalah sebagai berikut:

- (1) Mengukur dan mengevaluasi tegangan sisa pada sumbu x (σ_x), y (σ_y), dan (σ_z) pada bidang 110, menggunakan pengelasan busur logam manual dan pengelasan termit.
- (2) Mengukur dan mengevaluasi tegangan sisa pada sumbu x (σ_x), y (σ_y), dan (σ_z) pada bidang 200, menggunakan pengelasan busur logam manual dan pengelasan termit.
- (3) Menginterpretasikan nilai, pola, dan arah tegangan sisa berdasarkan bidang 110 dan 200 yang dirujuk.

Penelitian ini bertujuan untuk memastikan kelayakan pengelasan rel R-54 dengan pengelasan busur logam manual dan pengelasan termit dengan mempertimbangkan kandungan tegangan sisa. Dengan mengetahui besaran dan arah tegangan sisa hasil sambungan, pengelasan busur logam manual dan pengelasan termit dapat dipilih. Lingkup studi ini adalah sambungan las rel R-54, yang dihasilkan dengan pengelasan busur logam manual dan pengelasan termit.

II. TINJAUAN LITERATUR

Pelat baja sering digunakan dalam konstruksi lepas pantai, sehingga masalah tegangan sisa sangat penting. Tegangan sisa pada las lepas pantai dapat memengaruhi umur kelelahan struktur, dan memengaruhi perhitungan perambatan retak kelelahan dan umur kelelahan (Lorentzen & Ibsen, 1995). Perambatan retak kelelahan harus serendah mungkin untuk mencegah keretakan, yang cukup berbahaya. Tegangan sisa tekan yang diinduksi pengelasan akan menstabilkan retak di akar las ketika tekanan rendah (Tsai et al, 1998) karena di akar, gradien kekerasan antara logam dasar dan logam las rentan terhadap keretakan.

Persamaan yang berkaitan dengan difraksi neutron dikenal sebagai Hukum Bragg dan memberikan hubungan antara posisi sudut berkas difraksi yang diperkuat, dan jarak antara kristal. Hal ini diwakili oleh (Bragg, 1928; Cullity, 1978).

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (1)$$

Dalam kasus ini, λ = panjang gelombang radiasi neutron, dan θ (o) = sudut difraksi.

Sebuah penampang batang diregangkan secara elastis dengan gaya F, dengan tiga tegangan pada sumbu x, y, dan z yaitu $\sigma_x = (F/A)_x$, $\sigma_y = (F/A)_y$, dan $\sigma_z = (F/A)_z$. Ketiga tegangan tersebut menyebabkan regangan ϵ , dan dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\sigma = E\epsilon \quad (2)$$

Disini E = modulus elastisitas.

Jika material batang dianggap isotropik, maka regangan berhubungan dengan:

$$\epsilon_y = \epsilon_z = -\nu \epsilon_x \text{ atau } \epsilon_y = \epsilon_z = -\frac{\nu}{E} \sigma_y \quad (3)$$

Tegangan sisa adalah arah sumbu x, y dan z adalah σ_x , σ_y dan σ_z

Dalam kasus ini, ν = rasio Poisson (sebagian besar logam dan paduan, $0,25 \leq \nu \leq 0,45$). Tegangan akan menyebabkan perubahan pada d dan dinyatakan dengan:

$$\epsilon = \frac{d_n - d_o}{d_o} \quad (4)$$

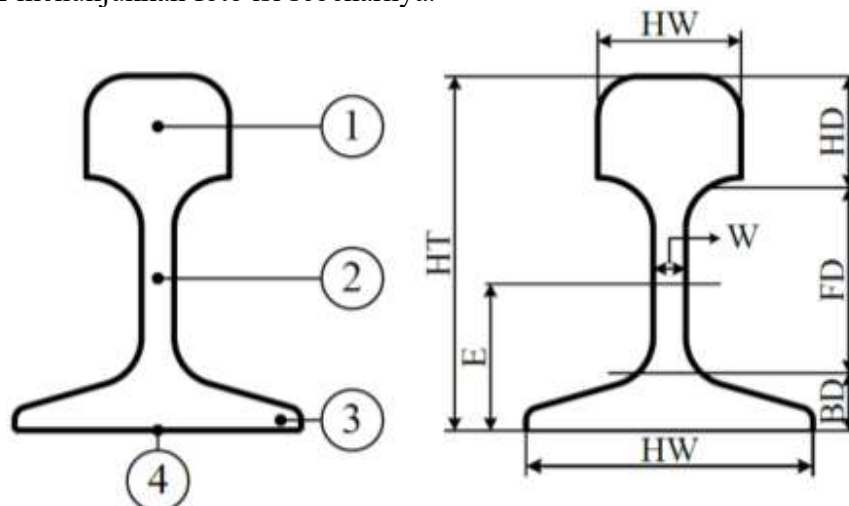
Dalam hal ini, d_n = jarak bidang sejajar sumbu batang, tegangan dalam Å. d_o = jarak bidang sejajar sumbu batang, tegangan dalam Å.

Pola tegangan sisa bersifat acak dan selalu mengarah ke tengah lasan sehingga menyebabkan pengerasan berlebihan akibat peningkatan kepadatan (Yurianto et al, 2019). Tegangan sisa pengelasan memengaruhi kinerja struktur las, ketahanan terhadap patahan, ketahanan terhadap perambatan retak kelelahan, kekuatan kelelahan, dan periode kelelahan (Hensel et al, 2017). Tegangan sisa pengelasan memiliki pengaruh besar pada umur kelelahan getaran penyangga peredam kejut kapal (Li et al, 2018). Induksi selektif tegangan tekan sisa pada komponen dapat meningkatkan sifat produk seperti kekuatan kelelahan (Maaß et al, 2018). Tegangan sisa yang dihasilkan pada struktur baja secara luas dikategorikan menjadi tegangan sisa awal selama pembuatan material baja, tegangan sisa pengelasan yang disebabkan oleh pengelasan, dan tegangan sisa akibat perlakuan panas (Park & Woo, 2018). Semua logam selalu mengandung tegangan sisa dari proses sebelumnya (termasuk proses pembuatan rel R54). Distribusi kekerasan pada sambungan las selalu mengarah ke garis tengah lasan (bagian tengahnya keras dan rapuh). Tegangan sisa dan relaksasi pengelasan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap perambatan retak kelelahan pada sambungan las, dan oleh karena itu mempengaruhi umur kelelahan sambungan las (Cui et al, 2019).

III. MATERIAL DAN METODE

1. Material

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah rel kereta api tipe R-54; isinya berupa logam dasar. Dimensi skematis peralatan ditunjukkan pada Gambar 1, dan Gambar 2 menunjukkan foto isi sebenarnya.



Each letter and number in Figure 1 explained as follows: 1 Head. 2 Body. 3 Foot flange. 4 The bottom of the rail [1]. HT = Total height (173 mm). BW = Base width (139.7 mm). HW = Head width (67.5 mm). W = Neck (15.875 mm). HD = Head height (47.625 mm). FD = Fishing (96,8375 mm). BD = Tinggi dasar (28,575 mm). E = Elevasi lubang baut (73,025 mm).

Gambar 1. Nomenklatur rel R-54

2. Metode

Prosedur penelitian ini adalah menyiapkan spesimen untuk mengetahui besarnya tegangan sisa pada sambungan las yang dihasilkan oleh pengelasan busur logam manual dan pengelasan termit.

Pengukuran tegangan sisa dilakukan menggunakan difraksi sinar neutron dengan tahapan, seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Berdasarkan sudut puncak dan panjang gelombang sinar neutron, jarak dari bidang kristal sebelum (logam dasar) dan setelah tegangan (zona yang terkena panas) diperoleh.



Gambar 2. Penampang lintang rel R-54

Sudut puncak difraksi ditentukan dengan pemindaian pada bidang (110) dan (200) sebagai berikut:

- Sudut $52,6^\circ$ hingga $54,9^\circ$ (logam dasar) adalah bidang 110. Dengan melibatkan sudut θ dan panjang gelombang radiasi neutron, jarak antara bidang d diperoleh. Setiap bidang diukur dari garis fusi (garis tengah las) ke jarak 1 mm, 3 mm, 5 mm, dan 7 mm. Pengukuran menghasilkan sudut puncak 2θ . Nilai d dihitung menggunakan persamaan (1) dan regangan (dalam arah x , y , dan z) diperoleh. Dalam tiga arah, tegangan sisa dihitung menggunakan persamaan (5) hingga (7).
- Untuk bidang 200, dengan sudut $78,5^\circ$ hingga $80,5^\circ$ (zona yang terkena panas), perhitungan dilakukan dengan cara yang sama seperti untuk bidang 110.
- Hasil perhitungan untuk item (a) dan (b) ditunjukkan pada Tabel 1.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil

Pemindaian dilakukan pada bidang-bidang sebagai berikut:

- Bidang (110) pada sudut puncak $2\theta = 52,6^\circ$ hingga $2\theta = 54,9^\circ$, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan Gambar 4.
- Bidang (200) pada sudut puncak $2\theta = 78,5^\circ$ hingga $2\theta = 80,5^\circ$, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan Gambar 5.

2. Pembahasan

Berdasarkan kandungan karbon baja rel R54 sebesar 0,45–1,70%, kekuatan totalnya adalah 36–47 kg/mm², kekuatan tariknya adalah 65–100 kg/mm², dan perpanjangannya adalah 20% hingga 11%. Artinya bahwa peningkatan kandungan karbon dalam baja mengurangi pemanjangan, meningkatkan kekerasan, dan kerapuhan.

Kekerasan rata-rata logam dasar rel adalah 310,5 kg/mm². Selain itu, sambungan las (logam dasar—zona yang terkena panas—logam las—area yang terkena panas—logam dasar) memiliki kekerasan 288,773 HVN \approx 930 N/mm² (Yurianto, 2008; Yurianto, 2009).

R54 dibuat dengan penggulangan panas di pabrik dan meninggalkan tegangan sisa setelah pendinginan hingga suhu ruangan. Tegangan sisa awal adalah tegangan tekan akibat proses penggulangan panas dan pendinginan. Kedua tegangan sisa tersebut adalah tegangan sisa awal yang sudah ada dalam material yang sedang diteliti. Tegangan ini berubah sebagian (pada beberapa logam dasar dan logam las) akibat proses pengelasan. Saat mengalami pendinginan udara atmosfer, tegangan sisa akhir tercipta di logam dasar, area yang terkena panas, dan logam las. Batas antara kedua zona ini merupakan area yang rentan retak karena perbedaan struktur mikro.

Tegangan tercipta pada sambungan las dari penyusutan las saat mendingin. Tekanan internal tercipta selama proses pembekuan logam las dan menghasilkan kontraksi. Tegangan ini saja mungkin cukup untuk menyebabkan retak tertunda pada baja berkekuatan tinggi jika terdapat hidrogen. Hidrogen dihasilkan oleh fluks selama pengelasan dan membentuk uap udara yang terjepit di antara butiran (atau batas butiran). Unsur ini menyebabkan retak pada logam, terutama antara logam dasar dan zona yang terkena panas.

1) Bidang 110

Gambar 4 menunjukkan pola tegangan sisa pada arah sumbu x. Tegangan sisa yang dihasilkan oleh pengelasan busur logam manual adalah negatif (tegangan tekan), dan pengelasan termit adalah positif (tegangan tarik). Tegangan tekan sisa cocok untuk mengantisipasi beban tarik, di mana beban tarik sisa rentan terhadap retak. Tegangan sisa yang rendah dari pengelasan busur logam manual terlihat jelas karena pengelasan berlapis-lapis dan sedikit masukan panas digunakan. Tegangan sisa pada arah sumbu y (Gambar 4) menunjukkan pola dan tren yang serupa, dan tegangan sisa sedikit terkompresi. Arah sumbu z menunjukkan desain dan arah yang sama, dan tegangan sisa sedikit tarik.

Untuk bidang 110, tegangan sisa tertinggi dihasilkan oleh pengelasan termit, dengan input yang lebih tinggi daripada pengelasan busur logam manual. Pengelasan busur logam manual dilakukan dalam beberapa lapisan menggunakan input panas yang lebih rendah.

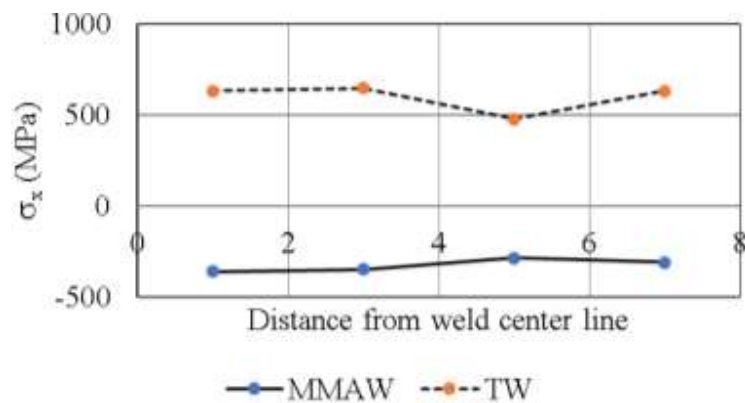
2) Bidang 200

Seperti yang ditunjukkan pada sumbu x pada Gambar 5, tegangan sisa yang dihasilkan dari pengelasan busur logam manual dan termit adalah tegangan tarik (karena keduanya positif). Tegangan ini rentan terhadap keretakan, terutama pada dua penyangga bantalan rel, yang menyebabkan rel bawah mengalami tegangan tarik. Pada sumbu y, tampaknya tegangan sisa yang dihasilkan oleh pengelasan busur logam manual dan pengelasan termit cenderung positif (kedua tegangan sisa positif). Tegangan sisa ini sangat rentan terhadap gaya sentrifugal (jika rel berbelok ke kanan) karena meningkatkan tegangan tarik pada rel. Tegangan sisa pada arah sumbu z pengelasan busur logam manual dan pengelasan termit adalah positif (cocok untuk menahan berat kereta api pada arah tegak lurus terhadap sumbu x).

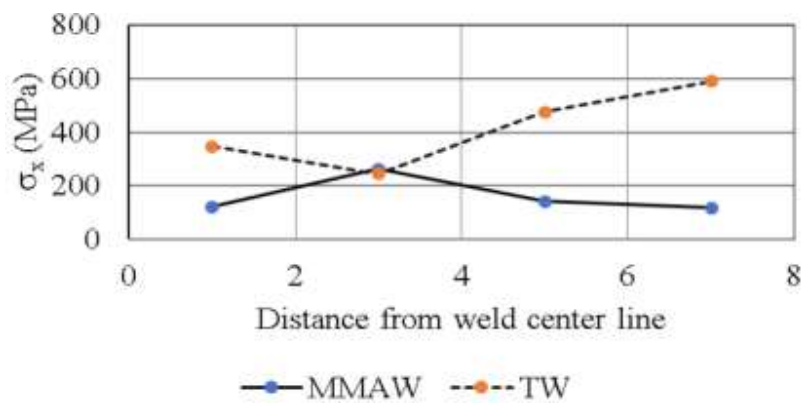
Karena rel R54 berada di lingkungan operasi terbuka, risiko penurunan ketahanan retak cukup besar (terutama dalam kondisi korosif). Lingkungan seperti itu sering mengurangi umur kelelahan, dan ini disebut kelelahan korosi [14].

Tegangan sisa pada arah sumbu x, y dan pada bidang 110 dan bidang 200 ditunjukkan pada Gambar 3 sampai dengan Gambar 8.

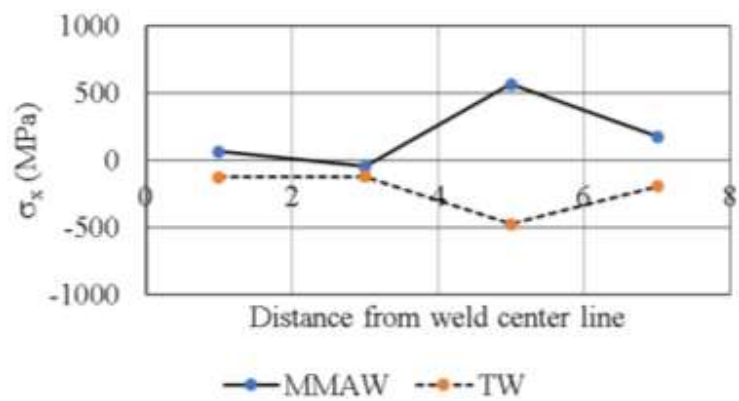
Pengelolaan tegangan sisa (manajemen tegangan sisa) diatur dengan melihat nilai tegangan sisa, tegangan sisa positif (artinya tegangan sisa tarik). Tegangan sisa tarik harus waspada, karena tegangan seperti ini akan mudah mengalami kegagalan jika terbebani oleh gaya tarik (seperti gaya sentrifugal pada tikungan rel).



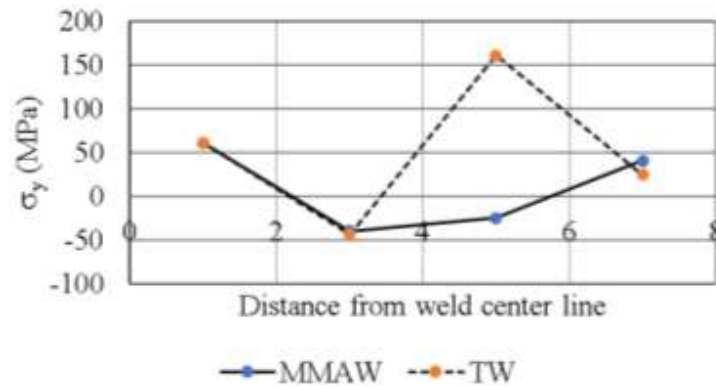
Gambar 3. Tegangan sisa arah sumbu x pada bidang 110



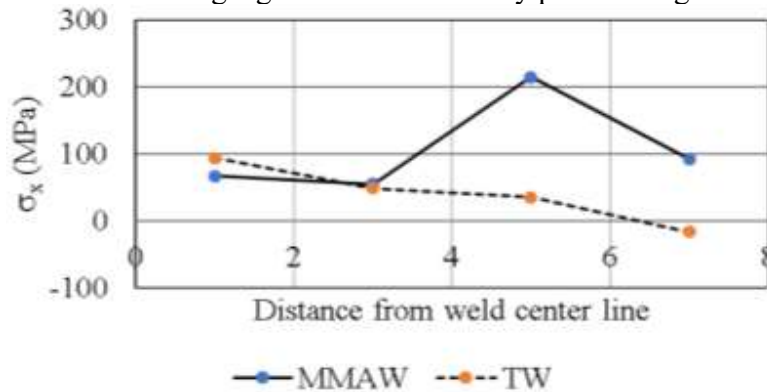
Gambar 4. Tegangan sisa arah sumbu x pada bidang 200



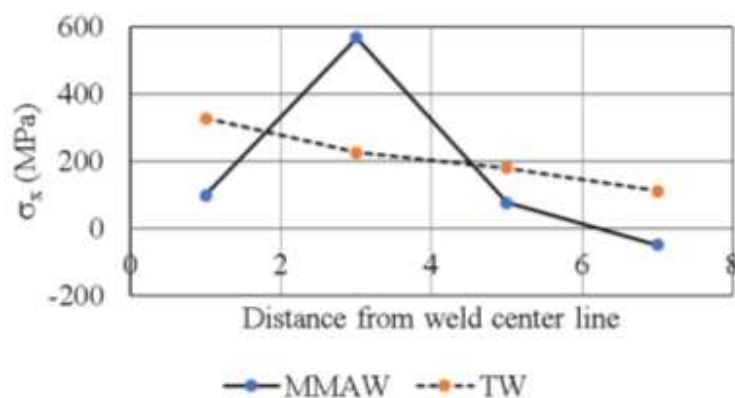
Gambar 5. Tegangan sisa arah sumbu y pada bidang 110



Gambar 6. Tegangan sisa arah sumbu y pada bidang 200



Gambar 7. Tegangan sisa arah sumbu z pada bidang 110



Gambar 8. Tegangan sisa arah sumbu z pada bidang 200

Tegangan sisa negatif (artinya tegangan sisa tekan). Tegangan sisa tekan cukup baik untuk mengatasi gaya sentrifugal pada tikungan rel).

V. KESIMPULAN

Hasil penelitian dan tinjauan pustaka di atas memperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil tegangan sisa pengelasan busur logam manual pada bidang 110 adalah $\sigma_x = -325,3133$ MPa, $\sigma_y = 190,2975$ MPa, dan $\sigma_z = 107,3935$ MPa. Untuk pengelasan termit pada bidang 110, hasilnya adalah $\sigma_x = 580,286$ MPa, $\sigma_y = -228,1888$ MPa, dan $\sigma_z = 40,482$ MPa.

2. Untuk pengelasan busur logam manual pada bidang 200, hasil tegangannya adalah $\sigma_x = 161,428$ MPa, $\sigma_y = 9,4128$ MPa, dan $\sigma_z = 174,0023$ MPa. Pengelasan termit menghasilkan nilai $\sigma_x = 414,3708$ MPa, $\sigma_y = 50,8898$ MPa, dan $\sigma_z = 211,5053$ MPa.
3. Tegangan sisa tekan (akibat adanya gaya tekan) dan tegangan sisa tarik (akibat adanya gaya tarik) berguna untuk mengatasi beban tarik dan tekan.

VI. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas kesempatannya untuk mempresentasikan artikel dalam Seminar Nasional SENS 10 (*Science and Engineering National Seminar*). Fakultas Teknik dan Informatika (FTI) UPGRIS.

VII. REFERENSI

- [1] WEMAN, K. (2003) *Welding Processes Handbook*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- [2] LORENTZEN, T., and IBSO, J.B. (1995) Neutron diffraction measurements of residual strains in offshore welds. *Materials Science and Engineering: A*, 197, pp. 209-214.
- [3] TSAI, C. L., LIAW, M. L., and TENG, D. J. I. (1998) Effect of residual stresses on design assessment of partial penetration laser welds in a pressure valve component. *Welding Journal*, 77 (10), pp. 403-410.
- [4] BRAGG, W. (1928) *An Introduction to Crystal Analysis*. London: G. Bell and Sox.
- [5] CULLITY, B. D. (1978) *Element of X-Ray Diffraction*. 2nd ed. Reading, Massachusetts: Addison-Wessley
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (2005) *Measurement of Residual Stress in Materials Using Neutrons*. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- [7] YURIANTO, PRATIKTO, SOENOKO, R., SUPRAPTO, W., and SULARDJAKA. (2019) Pattern and Direction of Microstrain in Q&T Steel Weld Joint. *MATEC Web of Conferences*, 269, 02008.
- [8] HENSEL, J., NITSCHKE-PAGELA, T., TCHOFFO NGOULA, D., BEIER, H.-Th., and TCHUINDJANG, D. (2017) Welding residual stresses as needed for the prediction of fatigue crack propagation and fatigue strength. *Engineering Fracture Mechanics*, 198, pp. 123-141.
- [9] LI, L., GU, X., SUN, S., WANG, W., WAN, Z., and QIAN, P. (2018) Effects of welding residual stresses on the vibration fatigue life of a ship's shock absorption support. *Ocean Engineering*, 170, pp. 237-245.
- [10] MAAß, F., GIES, S., DOBECKI, M., REIMERS, W., BRÖMMELHOFF, K., TEKKAYA, A.E., and REIMERS, W. (2018) Analysis of Residual Stress State in Sheet Metal Parts Processed by Single Point Incremental Forming. *AIP Conference Proceedings*, 1960, 160017.
- [11] PARK, J.-U., AN, G., and WOO, W. (2018) The effect of initial stress induced during the steel manufacturing process on the welding residual stress in multi-pass butt welding. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 10, pp. 129-140.
- [12] CUI, C., ZHANG, Q., BAO, Y., BU, Y., and LUO, Y. (2019) Fatigue life evaluation of welded joints in steel bridge considering residual stress. *Journal of Con*

- [13] YURIANTO (2008) Pola Tegangan Sisa Sambungan Las Rel R54 Hasil Pengelasan Thermite. In: Seminar Nasional – VII Reka-yasa dan Aplikasi Teknik Mesin di Industri Kampus ITENAS, Bandung, October 2008. Bandung: Institut Teknologi National, p. 17-18.
- [14] YURIANTO (2009) Pola Tegangan Sisa Sambungan Las Rel R54 Hasil Pengelasan SMAW. In: Seminar Nasional – VIII Rekayasa dan Aplikasi Teknik Mesin di Industri Kampus ITENAS, Bandung, 24-25 November 2009. Bandung: Institut Teknologi National, pp.5-6.