

Studi Komparasi Pengelasan Tandem dan Multi-run terhadap Sifat Mekanis pada Sambungan Las Aluminium Paduan AA5083

M. Afif Fatchunni'am¹, M. Noer Ilman¹, N. Akhmad Triwibowo²

¹Teknik Mesin dan Industri Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, Indonesia

²Sekolah Tinggi Teknologi Adisutjipto (STTA) Yogyakarta, Indonesia

Jl. Grafika No. 2, Yogyakarta, 55281

Jl. Janti Blok. R, Lanud Adisutjipto, Bantul, Yogyakarta, 55198

e-mail : muhammadafif@mail.ugm.ac.id

Received 31 Januari 2022 | Revised 10 Februari 2022 | Accepted 17 April 2022

ABSTRAK

Aluminium paduan AA5083 banyak digunakan dalam industri konstruksi, otomotif dan perkapalan karena memiliki sifat-sifat fisik dan mekanis yang baik, yaitu bobot yang ringan, kekuatan tarik tinggi, sifat mampu las (weldability) yang baik dan tahan terhadap korosi. Salah satu metode penyambungan yang banyak digunakan di industri manufaktur untuk aluminium adalah teknik pengelasan metal inert gas (MIG) karena dapat menghasilkan sambungan las dengan kekuatan mekanik yang tinggi dibandingkan dengan teknik penyambungan lainnya. Pengelasan MIG memiliki keterbatasan apabila pelat yang akan disambung cukup tebal karena membutuhkan pengelasan beberapa kali (multi-run) sehingga memakan waktu yang relatif lama. Penggunaan metode pengelasan tandem dinilai dapat mempersingkat waktu produksi. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi komparasi antara pengelasan multi-run dan tandem dengan jarak antar torch 50 mm dalam hal sifat-sifat mekanis las. Pengelasan dilakukan dengan menggunakan teknik las MIG dan elektroda ER5356. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengelasan tandem dapat mempercepat proses pengelasan namun memiliki kekuatan mekanis yang lebih rendah karena ukuran butiran las yang kasar dibandingkan pengelasan multi-run. Selain itu, distorsi yang terjadi pada pengelasan tandem lebih besar dibandingkan dengan pengelasan multi-run akibat masukan panas (heat input) pada las tandem yang tinggi.

Kata kunci : AA5083, las tandem, multi-run, heat input, MIG.

ABSTRACT

Aluminum alloy AA5083 is widely used in the construction, automotive, and shipbuilding industries because it has good physical and mechanical properties, namely lightweight, high tensile strength, good weldability, and corrosion resistance. One of the joining methods widely used in the manufacturing industry for aluminum is the metal inert gas (MIG) welding technique because it can produce welded joints with high mechanical strength compared to other joining techniques. MIG welding has limitations if the plate to be joined is quite thick because it requires multiple welding (multi-run) so it takes a relatively long time. The use of the tandem welding method is considered to be able to shorten production time. This study aims to conduct a comparative study between multi-run and tandem welding with a torch distance of 50 mm in terms of the mechanical properties of the weld. Welding is done using MIG welding technique and ER5356 electrode. The results showed that tandem welding can increase the welding speed process but has lower mechanical strength due to the coarser grain size of the weld compared to multi-run welding. In addition, the distortion that occurs in tandem welding is greater than that of multi-run welding due to the high heat input of tandem welding.

Keywords : AA5083, tandem welding, multi-run, heat input, MIG

1. Pendahuluan

Seiring dengan perkembangan industri bidang transportasi yang pesat seperti kereta api, perkapalan dan otomotif, kebutuhan akan struktur ringan (*lightweight structure*) untuk meningkatkan kecepatan dan penghematan bahan bakar meningkat pula. Hal ini bisa dilakukan melalui pemakaian pelat tipis dan pemilihan bahan yang ringan sebagai alternatif pengganti dari baja karbon. Aluminium paduan seperti seri 2xxx (Al-Cu), seri 5xxx (Al-Mg), seri 6xxx (Al-Mg-Si) dan seri 7xxx (Al-Zn) merupakan material yang banyak digunakan di bidang memiliki teknik karena beberapa keunggulan, diantaranya memiliki berat yang relatif ringan, tahan terhadap korosi, kekuatan tarik tinggi dan dapat mempertahankan kekuatannya pada temperatur dibawah nol dan tidak beracun. Khusus pada industri otomotif maupun perkapalan, paduan aluminium seri 5xxx merupakan pilihan utamanya, salah satunya adalah AA5083 yang merupakan paduan Al-(4-5,5%) Mg [1]. Aluminium AA5083 termasuk paduan yang tidak diberi perlakuan panas (*non heat-treatable*) sehingga mekanisme penguatan dilakukan dengan cara larutan padat (*solid solution*) dan pengerjaan dingin.

Teknik pengelasan merupakan metode penyambungan logam yang banyak digunakan untuk aluminium dan paduannya salah satunya adalah pengelasan MIG yang banyak digunakan untuk menyambung pelat AA5083 [2]. Las MIG (*Metal Inert Gas*) ini menggunakan gas mulia (*inert gas*) untuk melindungi busur listrik sedangkan kawat elektroda diumpankan secara kontinu oleh motor listrik sehingga proses pengelasan bisa dilakukan secara semi otomatis atau otomatis. Gas inert seperti argon pada pengelasan juga berfungsi sebagai pelindung dari oksidasi O₂ sehingga mencegah terbentuknya aluminium oksida dan mengurangi adanya porositas yang dapat mengurangi kualitas hasil las.

Pengelasan MIG memiliki beberapa keterbatasan apabila pelat yang digunakan cukup tebal sedangkan diameter elektroda yang digunakan relatif kecil. Keterbatasan tersebut mengakibatkan pengelasan tidak bisa dilakukan 1x kerja, sehingga perlu dilakukannya pengelasan beberapa kali (*Multi-Run*) untuk mendapatkan hasil yang diinginkan. Pengelasan ini akan berpengaruh pada waktu pengelasan yang lebih lama sehingga dapat menurunkan produktivitas pengelasan.

Berbagai metode pengelasan MIG telah dikembangkan untuk meningkatkan hasil pengelasan salah satunya adalah pengelasan tandem. Las Tandem adalah metode yang paling baik untuk meningkatkan produktivitas pengelasan. Pengelasan tandem dinilai mempunyai efektifitas produksi tinggi yang dapat dicapai dengan kecepatan pengelasan yang tinggi [3]. Metode pengelasan tandem merupakan metode yang menggunakan 2 sumber daya dan 2 elektroda pada saat pengelasan berlangsung dalam satu kali gerakan las [4].

Studi karakteristik pengelasan tandem telah dilakukan beberapa peneliti. Menurut Cai dkk.[5], posisi pengelasan sangat mempengaruhi kolam las (*weld pool*) akibat efek gravitasi dimana pada posisi datar (*flat*), permukaan kolam menjadi cekung sedangkan pada posisi vertikal, permukaan kolam lebih cekung lagi akibat lebih banyak logam pengisi yang mengalir pada kolam las. Selanjutnya, Ding dkk.[6] meneliti proses perpindahan massa las pada las tandem MIG dengan menggunakan pendekatan numerik. Hasil menunjukkan bahwa pada las MIG tunggal (konvensional) butiran las cair berpindah pada arah aksial sedangkan pada las tandem mengalami defleksi (non-axial) akibat pengaruh gaya elektromagnetik di antara dua elektroda. Pengembangan las tandem selanjutnya dilakukan oleh Ye dkk.[7] dengan menggunakan triple elektroda terumpan (*triple wire*). Hasil ini menunjukkan bahwa las tipe ini mampu mengendalikan terjadinya *humping* yaitu bentuk permukaan las cair yang cembung saat proses pengelasan berlangsung akibat aliran fluida (las cair) ke belakang las (*backward fluid flow*).

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perbandingan sifat fisis dan mekanis dari hasil sambungan las *multi-run* dan tandem dengan jarak antar elektroda sepanjang 50 mm. Interaksi

jarak elektroda dapat menghasilkan perbedaan masukan panas, sehingga dapat mempengaruhi kekuatan mekanis dan distorsi hasil pengelasan aluminium.

Dari kajian di atas dapat disimpulkan bahwa metode pengelasan tandem memiliki beberapa keunggulan. Namun dengan metode tersebut logam akan mengalami perubahan sifat fisis dan mekanis yang diakibatkan oleh masukan panas yang tinggi akibat dari interaksi antar elektroda. Permasalahan ini diangkat menjadi topik penelitian dan dianalisis untuk dicarikan solusinya.

2. Metodologi

Beberapa tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah persiapan alat dan bahan sebelum melakukan proses pengelasan, kemudian dilakukan pengelasan, pengujian spesimen, dan analisis. Dimensi plat AA5083 berukuran 300x100x4 mm yang dilas menggunakan filler ER5356. Komposisi kimia logam induk dan filler dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia AA5083 dan filler dalam wt% [8]

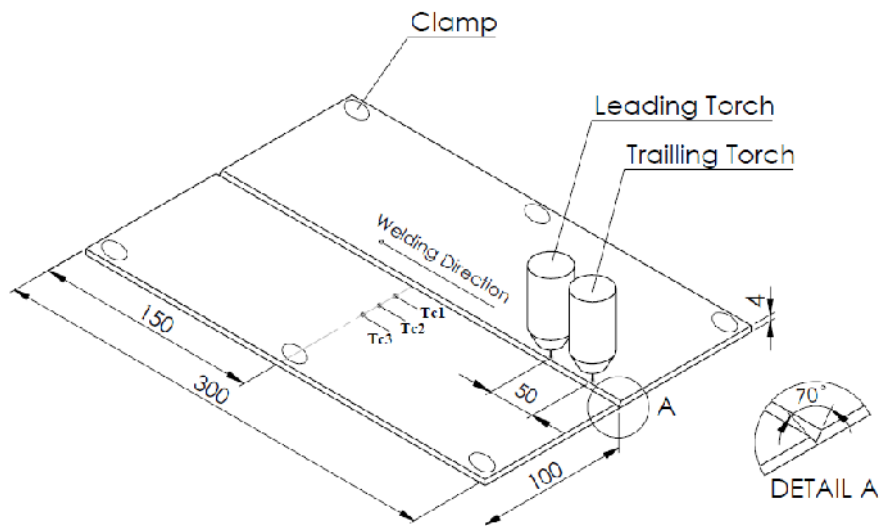
Material	Mg	Mn	Si	Fe	Cr	Cu	Zn	Ti	Al
AA5083	4,5	0,65	0,26	0,22	0,09	0,09	0,06	0,03	Bal.
ER5356	4,5-5,5	0,05-0,20	0,25	0,40	0,05-0,20	0,10	0,10	0,06-0,20	Bal.

Metode pengelasan yang digunakan adalah las tandem dan *multi-run* dengan skema yang ditunjukkan Gambar 1, dimana pengelasan tandem dilakukan dengan 1x gerakan las dengan 2 *torch* sekaligus sedangkan multi run dilakukan 2x gerakan las dengan 1 *torch*. Pada penelitian ini, kecepatan pengelasan dibuat 10 mm/s, laju aliran argon sebesar 25 L/menit, jarak *leading torch* dan *trailing torch* adalah 50 mm sedangkan parameter las lainnya ditunjukkan pada Tabel 2. Selama proses pengelasan, siklus termal las diukur dengan menempatkan 3 termokopel yaitu Tc1, Tc2 dan Tc3 masing-masing berjarak 10, 20 dan 30 mm dari pusat las.

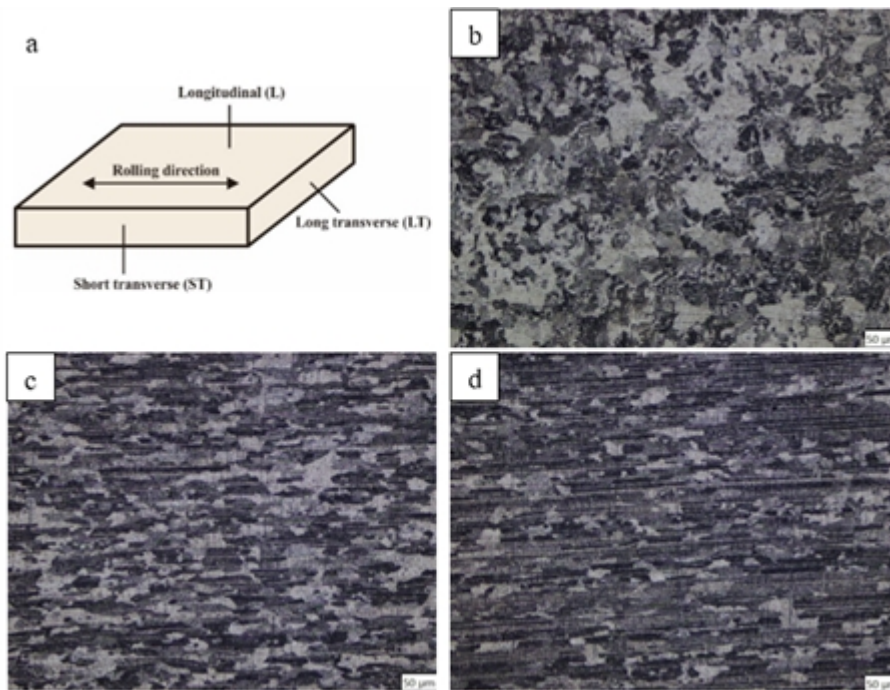
Tabel 2. Parameter pada masing masing *torch*.

Parameter	I (A)	E (v)	Wire speed (m/menit)
<i>Leading torch</i>	110	19	9
<i>Trailing torch</i>	120	20	8

Logam induk yang telah dilakukan pengampelasan dan dietsa dilakukan pengambilan struktur mikro. Pengambilan lokasi dibagi menjadi tiga pengambilan yaitu pada arah L (*longitudinal*), LT (*long transverse*), dan ST (*short transverse*). Hasil struktur mikro logam induk dapat dilihat pada Gambar 2.



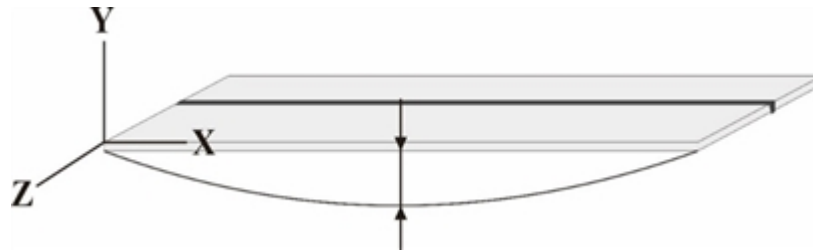
Gambar 1. Skema pengelasan *tandem* dengan jarak elektroda (*torch*) sebesar 50 mm.



Gambar 2. Struktur mikro logam induk (a) skema pengambilan, (b) arah *longitudinal*, (c) arah *long transverse*, dan (d) arah *short transverse*.

2.1. Pengujian Distorsi

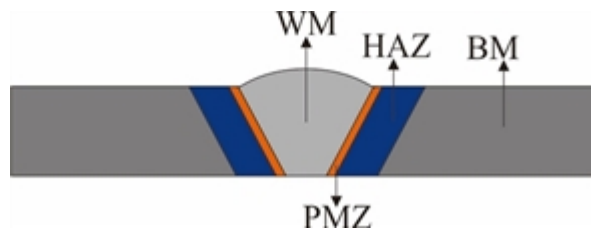
Pengukuran distorsi bertujuan untuk mengetahui kelengkungan plat setelah proses pengelasan yang dikibatkan oleh distribusi temperatur yang tidak merata ketika pengelasan terjadi. Pengukuran dilakukan pada arah longitudinal karena pada arah transversal relatif lebih kecil. Skema pengukuran distorsi dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema pengukuran distorsi.

2.2. Pengamatan Struktur makro dan mikro

Tujuan dilakukan pengamatan struktur makro dan mikro pada penelitian ini adalah untuk mengetahui perubahan struktur pada logam las atau *weld metal* (WM), daerah batas/transisi las dan HAZ atau dikenal dengan nama *partially melting zone* (PMZ) dan daerah terpengaruh panas atau *heat affected zone* (HAZ). Sebelum diuji spesimen dipoles hingga seperti kaca kemudian dietsa 20 detik. Komposisi cairan etsa yang digunakan adalah 25 ml HCl, 25 ml HNO₃, 25 ml etanol, dan 1 ml HF.



Gambar 4 Skema pengambilan struktur mikro.

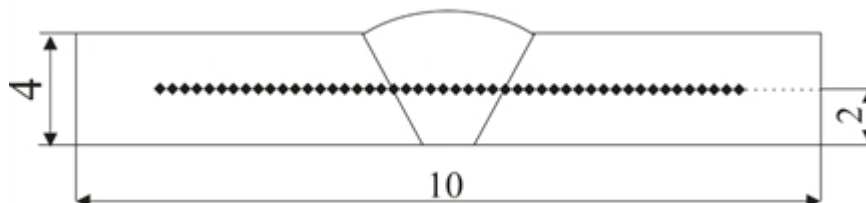
2.3. Pengujian kekerasan

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui variasi nilai kekerasan untuk masing-masing zona pada sambungan las (las, PMZ, HAZ dan logam induk). Pengujian dengan menggunakan kekerasan mikro Vickers dengan beban 100 gram force, waktu pembebanan 10 detik, dan jarak antar titik yang diukur adalah 500 μm . Titik yang diuji sejumlah 80 titik pengujian. Skema pengambilan data pijakan indenter dapat dilihat pada Gambar 5. Nilai kekerasan Vickers dapat dihitung menggunakan persamaan 1 dan 2.

$$D = (d_1 + d_2) / 2 \quad (1)$$

$$VHN = \frac{2P \sin(\frac{\alpha}{2})}{d^2} = \frac{1.854 P}{d^2} \quad (2)$$

Dimana D : panjang diagonal rata-rata (mm) dan VHN : angka kekerasan Vickers (kg/mm²).

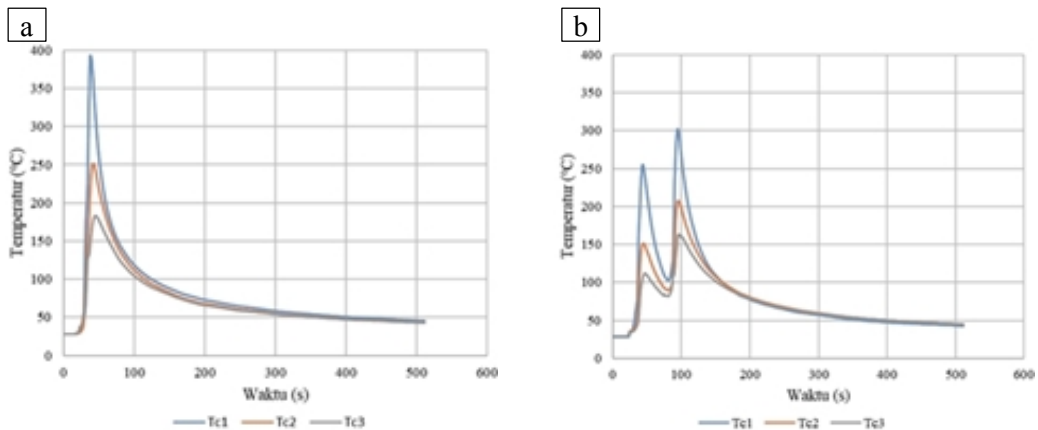


Gambar 5. Skema pijakan indenter vickers.

3. Hasil dan pembahasan

3.1. Siklus termal

Pengambilan siklus termal dilakukan menggunakan 3 buah *thermocouple* (Tc1, Tc2 dan Tc3) yang dihubungkan data logger dengan jarak masing masing 10, 20, 30 mm dari pusat las. Siklus termal yang terbentuk ketika pengelasan ditunjukkan oleh Gambar 6.



Gambar 6. Siklus termal pengelasan (a) Tandem dan (b) multi-run.

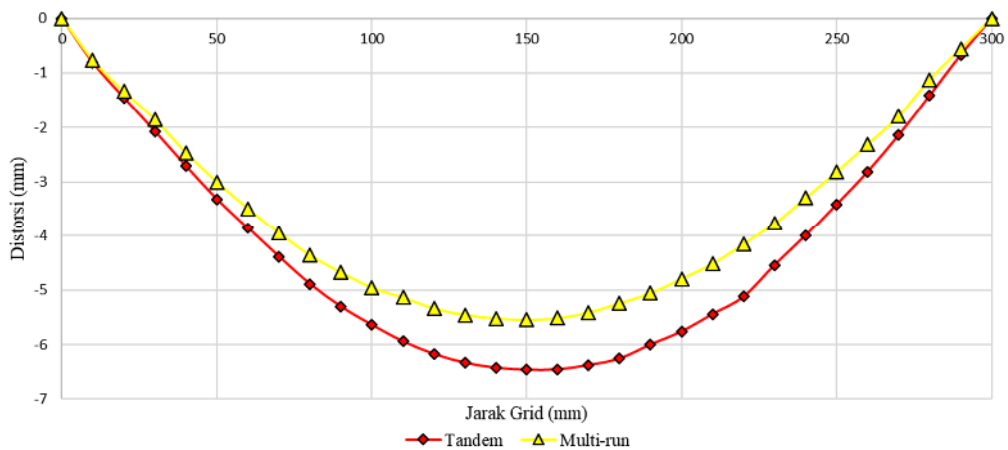
Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa interaksi *torch* pada pengelasan tandem akan terbentuk siklus termal yang berbeda dengan *multi-run* yang memiliki dua puncak karena jarak *torch* yang sangat jauh. Fenomena ini menunjukkan bahwa interaksi antar *torch* pada pengelasan tandem sangat berpengaruh pada *heat input* yang terjadi, semakin dekat jarak *torch* maka *heat input* yang terjadi semakin besar sehingga suhu pengelasan menjadi sangat tinggi dan pada pengelasan *multi-run* interaksi antar *torch* sangat jauh sehingga suhu pengelasan menjadi rendah. Siklus termal pada pengelasan ini mengikuti persamaan Rosenthal dua dimensi berikut [9]:

$$T - T_o = \frac{q_w}{h(4\pi k \rho c t)^{1/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \quad (3)$$

Dimana q_w : masukan panas, T_o : temperatur awal, h : tebal spesimen, k : konduktivitas termal, ρ : densitas, c : kapasitas panas, t : waktu, α : difusivitas dan r : jarak radial/lateral dari pengelasan.

3.2. Distorsi

Distorsi *longitudinal* yang terjadi pada pengelasan tandem dan *multi-run* diukur berdasarkan ketinggian terhadap bidang datar pada sumbu Y (*out-of-plane distortion*) sepanjang arah las (sumbu X) yang kemudian dibuat grafik rata-rata. Hasil pengukuran dapat ditinjau pada Gambar 7.



Gambar 7. Perbandingan distorsi pengelasan tandem dan multi run pada arah las (*longitudinal*).

Distorsi longitudinal yang terjadi merupakan distorsi *buckling* yang terjadi akibat dari proses pemuaian ketika proses pengelasan terjadi dan penyusutan ketika las mulai mendingin. Tegangan penyusutan σ_s arah longitudinal pada pelat segi empat sederhana [10] dinyatakan sebagai berikut :

$$\sigma_s = \mu_l \frac{\alpha_T q_w E}{\rho c A} \quad (4)$$

sedangkan tegangan kritis pelat σ_s dinyatakan dengan persamaan:

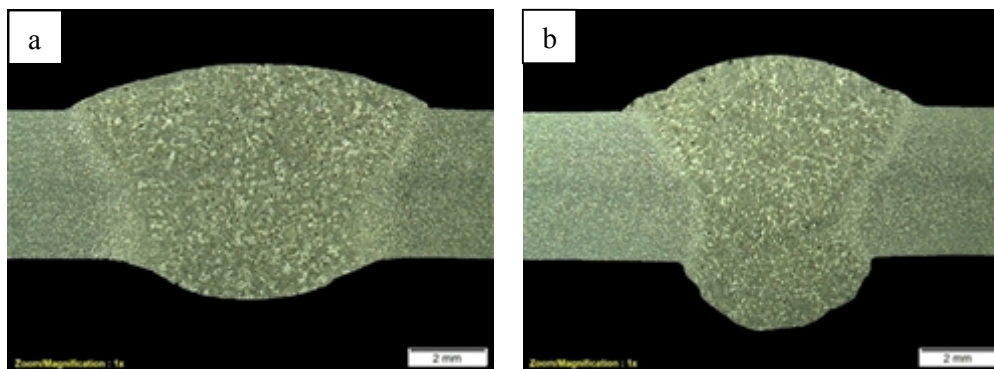
$$\sigma_{cr} = \frac{k\pi^2 E h^2}{12(1-\nu^2)w^2} \quad (5)$$

Dimana σ_s : tegangan penyusutan, σ_{cr} : tegangan kritis, μ_l : faktor kekakuan longitudinal, E : modulus elastisitas, A : luasan area (h x w), dan ν : rasio poisson.

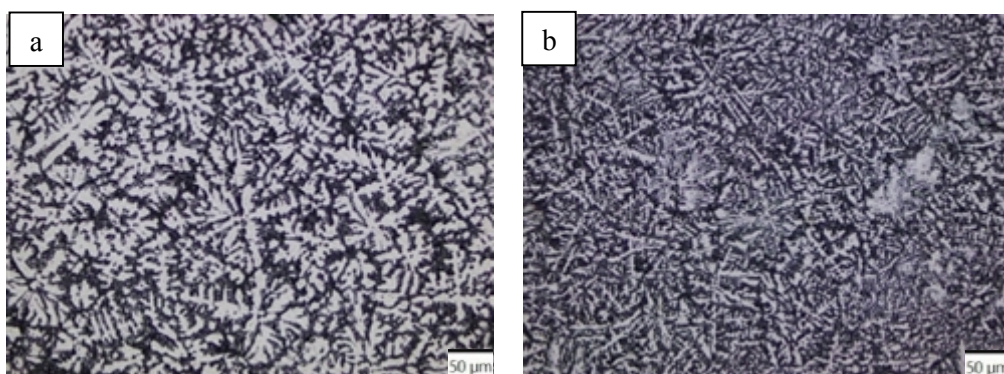
Distorsi terjadi jika nilai tegangan penyusutan (σ_s) melebihi tegangan kritis (σ_c) dan semakin besar nilai tegangan penyusutan maka distorsi yang terjadi akan semakin besar. Dari Persamaan (4) terlihat bahwa *heat input* berbanding lurus dengan nilai tegangan penyusutan sehingga semakin besar *heat input* maka tegangan penyusutan akan semakin besar pula. Hal ini sejalan dengan distorsi dari hasil pengelasan tandem yang besar dipengaruhi oleh *heat input* yang tinggi [11].

3.3. Struktur makro dan mikro

Gambar 8 menunjukkan hasil pengamatan makro dari sambungan las pengelasan tandem dan *multi-run* menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran rendah. Dari gambar terlihat bahwa profil las tandem lebih lebar sedangkan las *multi-run* cenderung lebih sempit tetapi penetrasinya lebih dalam. Hal ini kemungkinan disebabkan karena percampuran *filler* pada pengelasan tandem lebih merata dibandingkan dengan *multi-run* yang dihasilkan dari 2 lapisan pengelasan dimana lapisan pertama sudah mengalami pembekuan terlebih dahulu yang selanjutnya diikuti pengelasan lapis ke 2.



Gambar 8. Foto makro sambungan las (a) tandem dan (b) *multi-run*.

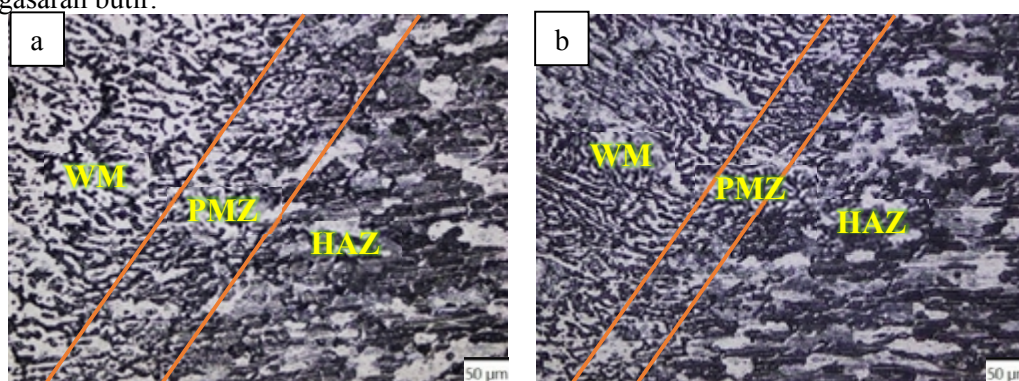


Gambar 9. Struktur mikro pada daerah las (a) tandem dan (b) *multi-run*.

Gambar 9 menunjukkan struktur mikro pada daerah las (*weld metal*) untuk las tandem dan *multi-run*. Secara umum struktur mikro berbentuk *dendrite* dan *equiaxed-dendritic* bagian dengan warna putih merupakan fasa α -Al sedangkan pada bagian berwarna hitam merupakan fasa β [12].

Bentuk butir kasar terlihat pada pengelasan tandem dan sedangkan pada pengelasan *multi-run*, butir terlihat halus. Hal ini dapat disebabkan karena semakin cepat laju pendinginan maka ukuran butir menjadi semakin halus [13]. Pada sisi lain, bentuk struktur mikro ditentukan oleh besarnya nilai G/R dimana G adalah gradien suhu dan R adalah laju pembekuan. Semakin rendah nilai G/R *exuiaxed-dendritic*.

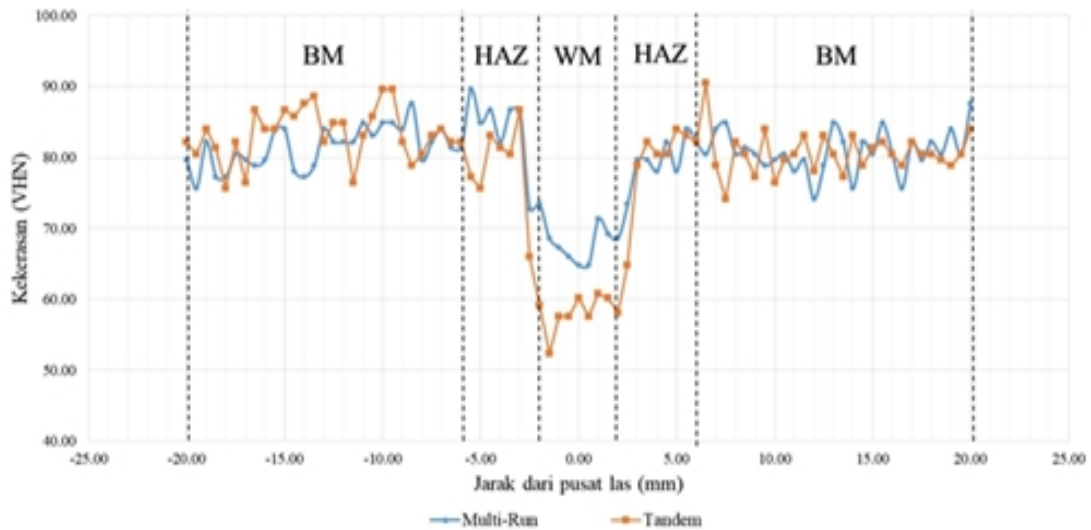
Disamping pengamatan struktur mikro di daerah las, daerah PMZ juga menjadi fokus pengamatan pada penelitian ini seperti terlihat pada Gambar 10. Dari gambar terlihat bahwa tidak terjadi perubahan yang signifikan pada daerah HAZ sedangkan luasan daerah *partially melting zone* (PMZ) cenderung mengalami penurunan luasan seiring dengan semakin jauhnya jarak interaksi antar *torch*. Hal ini berkaitan dengan pengaruh *heat input* yang dapat yang menyebabkan pengasaran butir.



Gambar 10. Struktur mikro pada bagian batas las (a) tandem dan (b) *multi-run*.

3.4. Distribusi kekerasan las

Pengujian kekerasan mikro dilakukan sepanjang zona-zona di daerah sambungan las (las, PMZ, HAZ dan logam induk) dengan jumlah 81 titik pengukuran dengan jarak masing-masing pijakan indenter adalah 500 µm dan hasil pengujian berupa distribusi kekerasan seperti terlihat pada Gambar 11. Dari gambar terlihat bahwa pada daerah las tandem mempunyai kekerasan lebih rendah dibandingkan las *multi-run*. Kekerasan rendah ini berhubungan dengan struktur mikro yang kasar pada las tandem. Dibandingkan dengan daerah las, bagian HAZ selalu memiliki kekerasan lebih tinggi [14] namun masih di bawah dari logam induk. Distribusi seperti ini biasanya terjadi pada pengelasan logam yang *non heat-treatable* seperti aluminium paduan AA5083. Nilai distribusi rata-rata kekerasan pada pengelasan tandem dan *multi-run* dapat ditinjau pada Tabel 3.



Gambar 11. Distribusi nilai kekerasan pengelasan tandem dan *multi-run*.

Berdasarkan Tabel 3 nilai kekerasan tertinggi pada bagian las terdapat pada *multi-run* dengan nilai 68,21 HV dan nilai terendah terdapat pada pengelasan tandem dengan nilai 58,15 HV . Hal ini disebabkan karena *heat input* berpengaruh pada struktur mikro yang terjadi, yaitu semakin tinggi *heat input* bentuk butiran semakin kasar sehingga nilai kekerasan turun.

Tabel 3 Distribusi rata-rata kekerasan Vickers pada pengelasan tandem dan *multi-run*.

Metode pengelasan	Nilai kekerasan (HV)	
	WM	BM
Tandem 50 mm	58,15	81,79
Multi-run	68,21	81,02

4. Kesimpulan dan saran

Kesimpulan dari penelitian ini diperoleh sebagai berikut :

- 1) Distorsi pada pengelasan tandem lebih besar daripada distorsi pada pengelasan *multi-run* akibat masukan panas (*heat input*) yang tinggi pada las tandem.
- 2) Struktur mikro di daerah las (*weld metal*) pada las tandem dan *multi-run* didominasi oleh struktur *equiaxed-dendritic* dan *dendrite*. Ukuran butir skstruktur mikro *multi-run* menjadi semakin halus karena interaksi elektroda pengelasan yang jauh. Hal ini berkaitan dengan laju pendinginan yang dapat mempengaruhi ukuran butir pada *weld metal*.
- 3) Nilai kekerasan Vickers pada las dipengaruhi oleh bentuk struktur mikro yang terjadi dimana semakin kasar struktur mikro kekerasan pada las menurun.
- 4) Pengelasan tandem memiliki keuntungan waktu pengelasan yang semakin singkat, namun kekuatan mekanis menjadi menurun sehingga perlu dilakukan suatu perlakuan untuk mempercepat laju pendinginan sehingga kekuatan mekanis dapat ditingkatkan

5. Ucapan terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada serta segenap rekan tim pengelasan dan staff laboratorium Bahan Teknik, Departemen Teknik Mesin dan Industri FT Universitas Gajah Mada yang telah mendukung penelitian ini.

6. Daftar Pustaka

- [1] Polmear, I. J. 1997. *Wrought aluminium alloys*. In *Materials Forum*. Vol. 21.
- [2] Mandal, N. R. 2017. *Ship Construction and Welding*, Springer Nature Singapore Pte Ltd , 2nd ed, USA.
- [3] Liu, G., Han, S., Tang, X., & Cui, H. 2021. Effects of torch configuration on arc interaction behaviors and weld defect formation mechanism in tandem pulsed GMAW. *Journal of Manufacturing Processes*, 62(January), 729–742.
- [4] Yao, P., & Zhou, K. 2017. Research of a multi-frequency waveform control method on double-wire mig arc welding. *Applied Sciences (Switzerland)*, 7(2)
- [5] Cai XY, Fan CL, Lin SB, Yang CL, Bai JY, 2016. Molten Pool Behaviors and Weld Forming Characteristics of All-Position Tandem Narrow Gap GMAW, *International Journal of Manufacturing and Technology*, 87:2437-2444.
- [6] Ding X, Li H, Yang L, Gao Y, 2013. Numerical Simulation of Metal Transfer Process in Tandem GMAW, *International Journal of Manufacturing and Technology*, 69:107-112.
- [7] Ye D, Wu D, Hua X, Xu C, Wu Y, 2017. Using the Multi-Wire GMAW Processes for Controlling the Formation of Humping, *Welding in the World*, 61:649-658.
- [8] Ilman, M. N., Sriwijaya, R. A., Muslih, M. R., Triwibowo, N. A., & Sehonon. 2020. Strength and fatigue crack growth behaviours of metal inert gas AA5083-H116 welded joints under in-process vibrational treatment. In *Journal of Manufacturing Processes* (Vol. 59, pp. 727–738).
- [9] Gray, T., Camilleri, D., & McPherson, N, 2014. *Control of welding distortion in thin-plate fabrication*. UK: Wood Publishing.
- [10] Radaj, D., 1992. *Heat Effect of welding*. Springer-Verlag: New York
- [11] Mudjijana, M. 2018. Physical and mechanical properties of semi-automatic MIG welding of AA5083H116 materials. *JMPM (Jurnal Material Dan Proses Manufaktur)*, 2(1), 8–16.
- [12] Ilman, M. N., Kusmono, Muslih, M. R., Subeki, N., & Wibowo, H. 2016. Mitigating distortion and residual stress by static thermal tensioning to improve fatigue crack growth performance of MIG AA5083 welds. *Materials and Design*, 99, 273–283.
- [13] KOU, S. 2003. *Welding metallurgy*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience
- [14] Jiang, Z., Hua, X., Huang, L., Wu, D., Li, F., & Cai, Y. 2019. High Efficiency and Quality of Multi-Pass Tandem Gas Metal Arc Welding for Thick Al 5083 Alloy Plates. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 24(2), 148–157.