



STUDI KARAKTERISTIK LASAN ALUMINIUM 6061-T6 DENGAN BERBAGAI METODE PENGELASAN

STUDY CHARACTERISTICS OF THE WELDING OF ALUMINUM 6061-T6 WITH VARYING WELDING METHODS

Josua Simaremare¹⁾, Suprianto²⁾

^{1,2}Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, Medan, Indonesia
email: josuasimaremare04@yahoo.com¹⁾, suprianto@usu.ac.id²⁾*

Received:
14 Juni 2025

Accepted:
11 September
2025

Published:
24 Oktober
2025



Abstrak

Penggunaan metode tungsten *inert* gas (TIG) dan metal *inert* gas (MIG) telah banyak dipergunakan untuk logam, namun metode *shielded metal arc welding* (SMAW) sangat jarang digunakan pada aluminium. Studi ini bertujuan untuk melihat kualitas lasan menggunakan ketiga metode tersebut untuk menyambung aluminium 6061-T6. Proses pengelasan menggunakan mesin las kombinasi dengan elektroda AWS: E4043, filler terdiri dari ER 4043 0.8, dan ER 4043. Pemeriksaan cacat menggunakan *Dye Penetrant Check*, uji kekerasan *Vicker*, dan pengujian tarik pada temperatur ruang telah dilakukan. Pengamatan visual mikrostruktur pada area *weld* dan *heat effected zone* (HAZ) pembesaran 200x menggunakan mikroskop optik. Hasil pengamatan visual memperlihatkan teknik SMAW menghasilkan cacat lebih banyak dibanding TIG dan MIG. Kekerasan tertinggi 63,8 HV pada daerah HAZ dan kekuatan Tarik 195,4 MPa diperoleh untuk pengelasan MIG. Hasil pengamatan visual mikrostruktur memperlihatkan HAZ mengalami transformasi berbentuk pipih dan kasar.

Kata Kunci: kekerasan, mikrostruktur, pengelasan, kekuatan tarik.

Abstract

Tungsten inert gas (TIG) and Metal inert gas (MIG) welding have been used to join varying materials; however, shielded metal arc Welding (SMAW) is rarely used for aluminum. This study aims to investigate the weld quality by using three welding methods for joining aluminum 6061-T6. The Welding process was carried out using a welding machine combination with an AWS electrode: E4043, filler consisting of ER 4043 0.8 and ER 4043. Defect inspection was performed using Dye Penetrant Check, Vickers hardness test, and tensile strength were carried out at room temperature. Visual observation of the microstructure at the weld and heat-affected zone (HAZ) areas with 200x magnification by using an optical microscope. The result shows more defects formed with SMAW in comparison with the TIG and MIG methods. The highest hardness, 63.8 HV, was achieved at the HAZ area, and a tensile strength of 195.4 MPa was obtained using the MIG technique. Microstructural observations reveal that the transformation in the HAZ area resulted in flat and coarse-grained structures.

Keywords: hardness, microstructure, welding, tensile strength.

PENDAHULUAN

Aluminium tipe 6061-T6 dengan elemen penyusun utama terdiri dari Al, Si, Mg, Fe, dan Cu merupakan jenis paduan logam yang banyak dipergunakan pada bidang keteknikan dikarenakan sifat mekanis yang cukup baik. Dalam aplikasi di bidang keteknikan sering melibatkan berbagai proses pembentukan seperti pengelasan. Berbagai metode pengelasan diantaranya *tungsten inert gas* (TIG), *metal inert gas* (MIG), dan *shielded metal arc welding* (SMAW). Metode TIG yang dalam prosesnya menggunakan elektroda tungsten yang dilengkapi gas *inert* dapat digunakan pada proses pengelasan aluminium 6061-T6 dengan filler menggunakan ER 6061[1], AW-6082 Al dengan berbagai jenis filler ER5356, 4043, dan 4047[2], metode ini juga telah digunakan pada proses penyambungan aluminium 2024[3]. Metode ini memiliki kelebihan karena kontrol proses yang cukup baik dan keberadaan gas *inert* berperan penting dalam mengurangi kontaminan dan oksida yang berasal dari lingkungan sekitar pada logam lasan yang mencair[4].

Meskipun metode TIG menawarkan keunggulan dalam kualitas las, keberadaan cacat seperti inklusi oksida tetap menjadi permasalahan karena dapat menurunkan karakteristik material[5]. Berbagai jenis kontaminan yang sering dijumpai pada proses pengelasan diantaranya oksigen. Penggunaan metode TIG yang dilengkapi gas *inert* pada proses penyambungan logam seperti aluminium dapat mengurangi kontaminan yang berasal dari atmosfer[6]. Selain TIG, jenis pengelasan yang juga menggunakan gas *inert* dalam prosesnya diantaranya MIG. Teknik pengelasan ini telah digunakan dalam menyambung aluminium seperti AA 1100 menggunakan filler ER5356[7], Aluminium 6082-T6 dengan filler ER5356[8], dan AlMg4.5Mn alloy (AW 5083) digunakan kawat filler nomor 5383[9]. Kekuatan Tarik sambungan *welded material aluminium* 6061-T6 dengan menggunakan metode MIG yang dilengkapi lengan robot dapat mencapai 144 MPa[10].

Penggunaan metode pengelasan menggunakan TIG dan MIG tentunya memiliki banyak kelebihan terutama dari segi kualitas lasan, namun metode ini juga memiliki kelemahan diantaranya biaya investasi lebih tinggi dan fleksibilitas. Metode lain yang digunakan dalam proses penyambungan adalah pengelasan SMAW. Proses penyambungan baja karbon sedang memperlihatkan adanya pengaruh media pendingin terhadap kekerasan material[11]. Beberapa jenis media pendinginan yang dapat digunakan pada pengelasan baja diantaranya air, udara, dan oli dan ketiga media pendingin ini berpengaruh terhadap sifat mekanis seperti kekuatan *bending*[12]. Pengelasan material BKI Grade (KI-A) dengan metode SMAW juga dapat dilakukan melalui proses *pre-heating* terlebih dahulu[13].

Pengelasan metode SMAW umumnya digunakan untuk penyambungan material baja, dikarenakan efek negatif seperti pembentukan cacat pada saat diterapkan pada pengelasan aluminium. Teknik TIG, MIG, dan *friction stir welding* telah diaplikasikan pada aluminium AA 6061 dengan berbagai heta input, heat input yang rendah pada FSW memperlihatkan hasil yang cukup baik[14]. Pada bagian lain, kajian mengenai penggunaan SMAW pada penyambungan aluminium dan *bronze* telah dilakukan telah dilaporkan[15].

Kajian mengenai pengelasan TIG, MIG, dan SMAW telah banyak dilakukan pada penelitian terdahulu, namun kajian mengenai studi penggunaan ketiga metode pengelasan tersebut pada penyambungan material aluminium 6061-T6 masih sangat terbatas. Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui bagaimana karakteristik mekanis dan cacat yang terjadi pada *similar join aluminium* 6061-T6 menggunakan metode TIG, MIG, dan SMAW.

METODE PENELITIAN

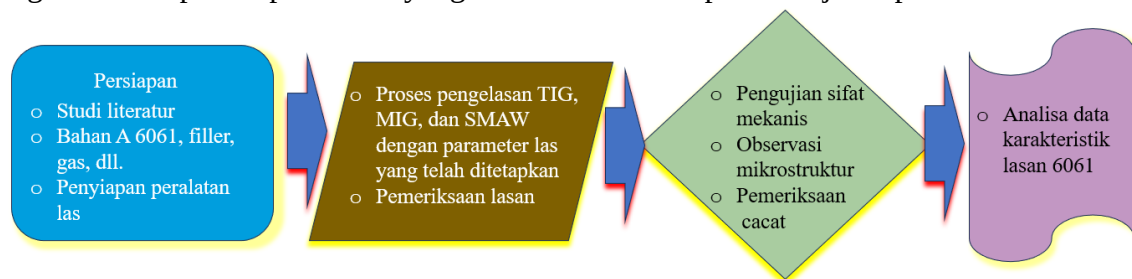
Topi penelitian eksperimental ini dilakukan kajian mengenai proses pengelasan *similar join* material pelat aluminium 6061-T6 dengan ketebalan 4 mm dengan komposisi diperlihatkan pada Tabel 1 dengan berbagai metode dan pengaruhnya terhadap karakteristik sambungan las.

Tabel 1. Komposisi penyusun *base metal* aluminium 6061-T6[16]

Elemen	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
(%)	0,48-0,55	0,27-0,3	0,18-0,23	0,05	0,92-0,99	0,09-0,13	0,03	0,06	balance

Variabel bebas yang diambil pada studi ini merupakan metode penyambungan terdiri dari TIG, MIG, dan SMAW yang masing-masing menggunakan filler AWS: E4043, ER 4043 0.8, dan ER 4043 secara berurutan. Komposisi masing-masing elektroda yang digunakan tidak jauh berbeda dengan kandungan utama terdiri dari (4,5-6) %Si, Fe < 0,8%, 0,3%Cu, (0,2)% Ti, dan Al merupakan elemen utama. Proses pengelasan dilakukan menggunakan mesin las kombinasi dengan spesifikasi utama peralatan sebagai berikut. Mesin ini memiliki daya masukan maksimum sebesar 6,0 kVA dengan arus masukan 27,5 A pada beban 100%. Sistem bekerja pada satu fase dengan tegangan utama 220 V serta frekuensi operasi 50/60 Hz. Faktor daya mesin adalah 0,7 dengan efisiensi 0,85 dan indeks proteksi IP 21 S.

Kegiatan penelitian yang meliputi proses pengelasan dan penyiapan sampel dilakukan di dua tempat utama yaitu Teknik Mesin USU dan Politeknik Negeri Medan. Selama proses pengelasan TIG dan MIG menggunakan gas pelindung argon untuk menghindari kontaminan yang berlebih pada area lasan pada saat logam mencair. Variabel terikat pada penelitian ini adalah sifat mekanis terdiri dari kekuatan tarik dan kekerasan, serta pengamatan visual mikrostruktur. Untuk mendapatkan karakteristik mekanis lasan, maka spesimen pengujian dibuat mengacu kepada standar AWS D1.2. Selanjutnya, sampel dilakukan pengujian Tarik pada suhu ruang. Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan standar *Vickers Hardness* dengan pembebanan 100 gr selama 30 detik. Untuk pengujian mikrostruktur menggunakan mikroskop optik pada pembesaran 200x dengan terlebih dahulu dilakukan proses persiapan sampel menggunakan kertas pasir diikuti proses etsa. Pada bagian lain, pengujian *Dye Penetrant Check* dilakukan menggunakan *penetrant* (SKL-SP2), *cleaner*, dan *developer* untuk mendapatkan permukaan yang mengalami cacat dilakukan pada suhu ruang. Data yang telah diperoleh dari berbagai pengujian dan pengamatan visual selanjutnya dilakukan analisa data menggunakan data primer dari rujukan utama. Secara singkat skema proses penelitian yang telah dilakukan seperti disajikan pada Gambar 1.



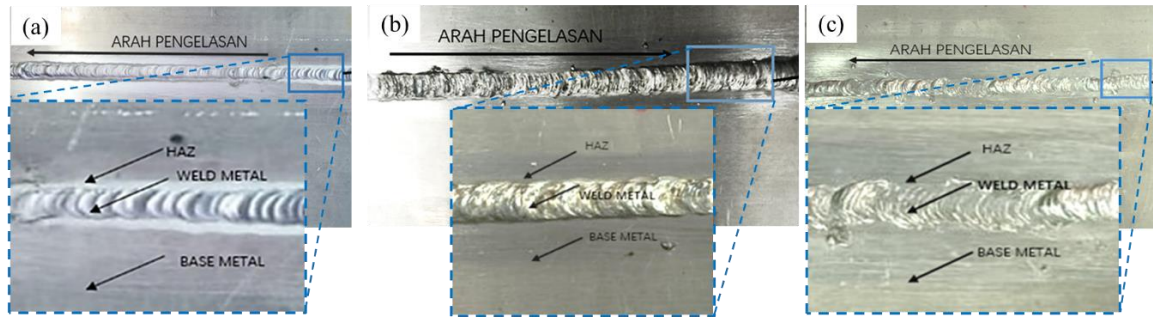
Gambar 1. Skema proses penelitian pengelasan pelat 6061 dengan berbagai metode; (a) TIG, (b) MIG, dan (c) SMAW

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 2 memperlihatkan hasil pengelasan *similar join* plat aluminium tipe 6061 dengan berbagai metode. Daerah lasan (*weld metal*), *heat effected zone* (HAZ), dan logam

base metal terlihat jelas pada pengelasan model TIG dengan kualitas yang rapi dan presisi diperoleh searah dengan pengelasan, lihat Gambar 2a. Kualitas yang baik pada permukaan lasan Al–Mg–Mn (AA6082) yang terbebas dari *crack* atau porositas diperoleh menggunakan metode TIG[17].

Penggunaan metode MIG menghasilkan permukaan sambungan yang baik juga diperoleh pada aluminium 6061, penggunaan gas pelindung menghasilkan permukaan las yang bersih bebas dari kotoran sepanjang arah pengelasan diperlihatkan pada Gambar 2b. Proses penyambungan aluminium 6061 juga berhasil dilakukan menggunakan metode SMAW (Gambar 2c), hasil pengamatan visual pengelasan jenis ini memperlihatkan area lasan kurang rapi dan terbentuknya terak di permukaan.



Gambar 2. Hasil pengelasan pelat aluminium 6061 dengan berbagai metode; (a) TIG, (b) MIG, dan (c) SMAW

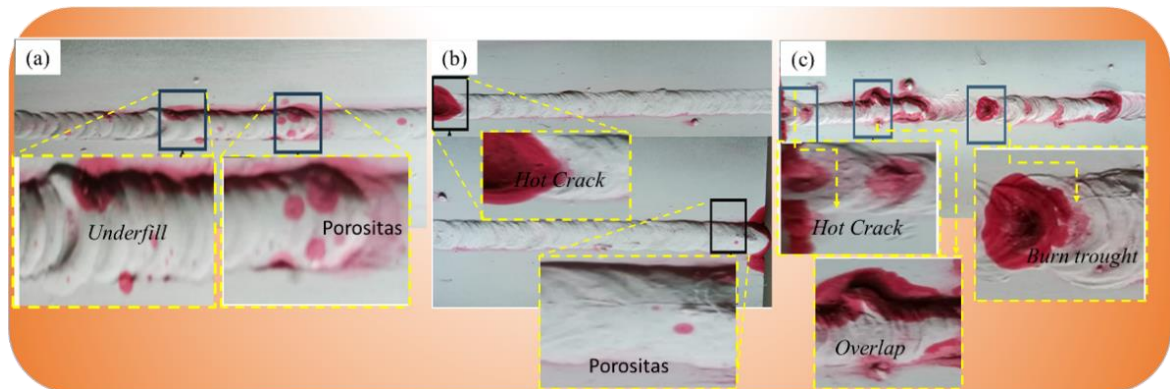
Kualitas dari berbagai metode pengelasan diamati lebih lanjut melalui pemeriksaan visual menggunakan teknik *Dye Penetrant Check*, dengan hasil pengujian yang ditampilkan Gambar 3. Pemeriksaan ini bertujuan untuk mengidentifikasi cacat permukaan yang terbentuk di daerah *weld metal*, HAZ, dan pada tepi logam lasan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa cacat seperti *undervil* dan porositas terbentuk pada area dekat HAZ dan *weld metal* secara berurutan dijumpai pada hasil pengelasan TIG dengan jumlah yang terbatas, lihat Gambar 3a. Keberadaan cacat *underfill* berkaitan dengan banyak faktor diantaranya kawat filler dan kecepatan pengelasan, *underfill* diketahui akan berpengaruh terhadap kekuatan Tarik lasan[18]. Pada metode MIG, terlihat bahwa cacat *hot crack* dan porositas yang lebih sedikit terlihat pada permukaan lasan metode MIG, lihat Gambar 3b. Faktor penyebab cacat *hot crack* seperti arus yang tidak tepat, kualitas gas, *heat input*, dan banyak faktor lainnya. Cacat jenis ini juga dijumpai pada pengelasan aluminium AA6061 menggunakan *laser welding* pada *heat input* lebih tinggi[19]. Berbeda dengan TIG dan MIG, pengelasan menggunakan metode SMAW menghasilkan jumlah dan jenis cacat yang lebih banyak, seperti *hot crack*, *overlap*, *burn trough*, dan porositas seperti diperlihatkan pada Gambar 3c. Berbagai cacat yang terbentuk seperti *overlap* dan *underfill* menyebabkan geometri sambungan hasil pengelasan menjadi tidak baik[20].

Sementara itu cacat porositas dijumpai di semua hasil lasan dengan jumlah berbeda, jumlah lebih sedikit diperoleh pada model MIG dan TIG yang menggunakan gas pelindung selama pengelasan. Sebaliknya porositas lebih banyak terbentuk pada metode SMAW, pembentukan cacat porositas salah satunya berkaitan dengan udara yang terjebak dan kontaminan selama proses pengelasan. Pembentukan porositas juga berkaitan dengan arus pengelasan dan ketebalan pelat telah dilaporkan pada penelitian lain[21].

Kekuatan sambungan las diperoleh melalui pengujian Tarik pada temperatur ruang, hasil pengujian diperlihatkan pada Gambar 4 dan dicantumkan pada Tabel 2. Kekuatan tarik (σ_{UTS}) tertinggi 195,4 MPa diperoleh pada sambungan aluminium 6061 menggunakan metode MIG dan sedikit menurun pada sambungan metode TIG, kekuatan yang terendah

130,6 MPa diperoleh pada sambungan las menggunakan metode SMAW, lihat Gambar 4a. Temuan ini sejalan dengan studi[22] yang melaporkan bahwa penggunaan metode MIG pada aluminium 6061 memberikan kekuatan tarik lebih baik dibandingkan TIG, disebabkan oleh penetrasi panas yang lebih stabil dan pembentukan fasa fusi yang homogen.



Gambar 3. Hasil pengujian *Dye Penetrant Check* pada hasil pengelasan pelat 6061 dengan berbagai metode; (a) TIG, (b) MIG, dan (c) SMAW

Tabel 2. Hasil uji kekuatan tarik sambungan aluminium 6061-T6 menggunakan metode pengelasan TIG, MIG, dan SMAW

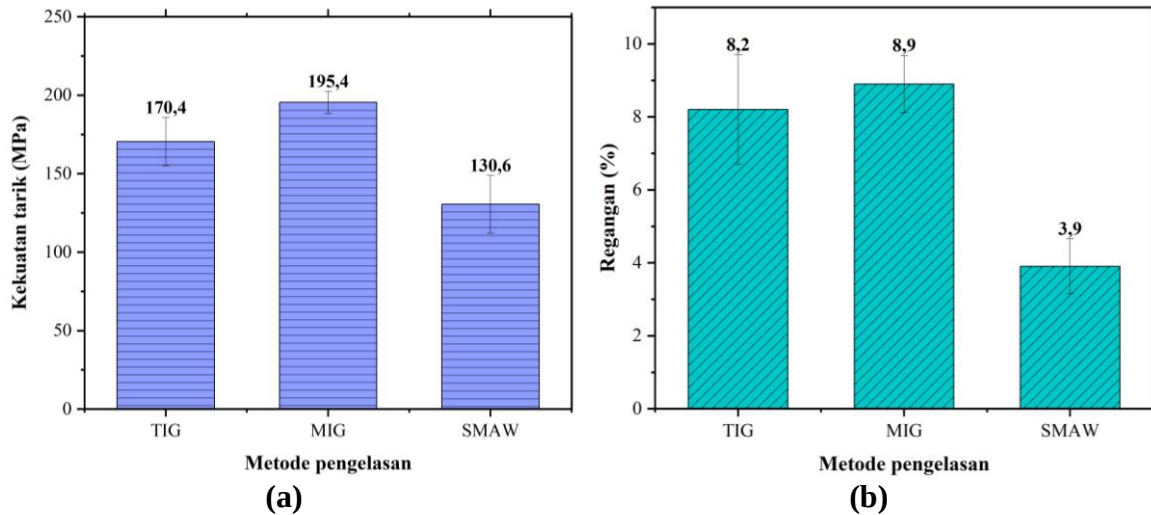
Metode pengelasan	Spesimen			Rata-rata (MPa)	Deviasi
	1	2	3		
TIG	165,7	158,1	187,5	170,4	15,3
MIG	199,6	199,3	187,1	195,3	7,1
SMAW	110,1	136,4	145,4	130,6	18,3

Perbedaan kekuatan tarik tersebut sejalan dengan hasil pengamatan cacat secara visual pada permukaan lasan, dimana metode SMAW menghasilkan cacat lebih banyak dibanding dua metode lainnya, lihat Gambar 3. Fakta ini diyakini memiliki peranan penting menyebabkan penurunan kekuatan sambungan las. Keberadaan porositas di daerah *weld metal* dari material aluminium 6082-T6 dapat memicu *fracture* yang terjadi tiba-tiba pada saat pengujian tarik dilakukan[23]. Selain kekuatan tarik, hasil pengujian juga menunjukkan nilai regangan yang terjadi pada sambungan las 6061-T6, dimana regangan tertinggi 8,9% dan terendah 3,9% diperoleh untuk metode pengelasan MIG dan SMAW secara berurutan, hal ini seperti diperlihatkan pada Gambar 4b. Hasil sangat berkesesuaian dengan kekuatan tarik dan pengamatan visual terhadap cacat menggunakan *Dye Penetrant Check* pada Gambar 3.

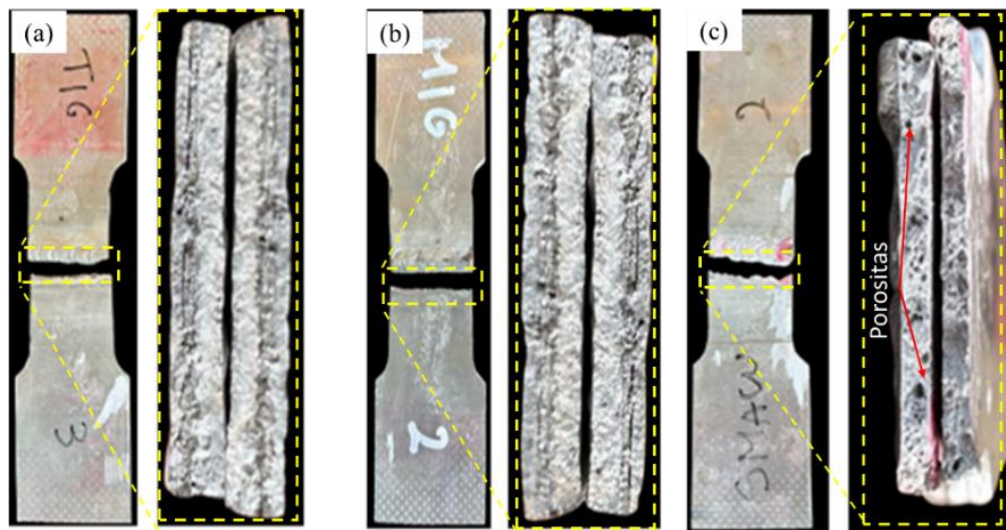
Bentuk patahan sampel uji Tarik selanjutnya dilakukan pengamatan secara visual menggunakan foto makro, hasilnya seperti diperlihatkan pada Gambar 5. Secara umum patahan yang terjadi berada pada daerah *gauge length* dari sampel uji serta berada pada daerah lasan/sambungan, khususnya metode TIG dan MIG seperti diperlihatkan pada Gambar 5a-b. Hal ini mengkonfirmasi sampel dan prosedur sesuai standar serta daerah yang paling rendah kekuatan adalah area lasan. Fakta ini diyakini karena proses pengelasan yang diikuti dengan adanya proses fusi atau pencairan logam berdampak terhadap perubahan struktur yang terbentuk di setiap area dan adanya kontaminan selama proses khususnya di area yang berdampak panas. Khususnya pada sampel lasan menggunakan metode SMAW terlihat jelas terbentuknya porositas mikro diantara struktur sambungan, lihat Gambar 5c. Dampak negatif keberadaan porositas terhadap kekuatan sejalan dengan hasil pengujian Tarik yang ditampilkan pada Gambar 4a.

Selain kekuatan Tarik, metode pengelasan yang berbeda juga berdampak terhadap kekerasan yang dihasilkan pada setiap area diantaranya *weld metal*, *HAZ*, dan *base metal*

diperlihatkan pada Gambar 6. Untuk berbagai metode pengelasan hasil pengujian kekerasan memperlihatkan nilai kekerasan tidak jauh berbeda, kekerasan berada pada rentang 50,7~63,8 HV untuk semua area.



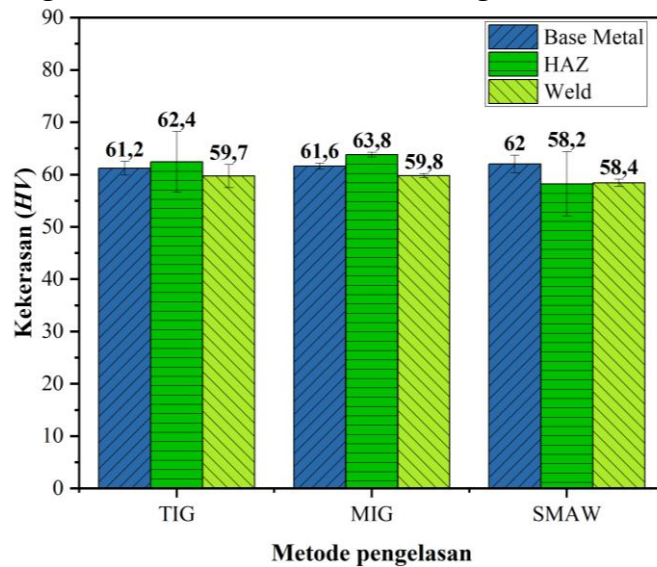
Gambar 4. (a) Kekuatan tarik (σ_{UTS}) dan (b) Regangan sambungan las aluminium 6061-T6 pada dengan berbagai metode pengelasan



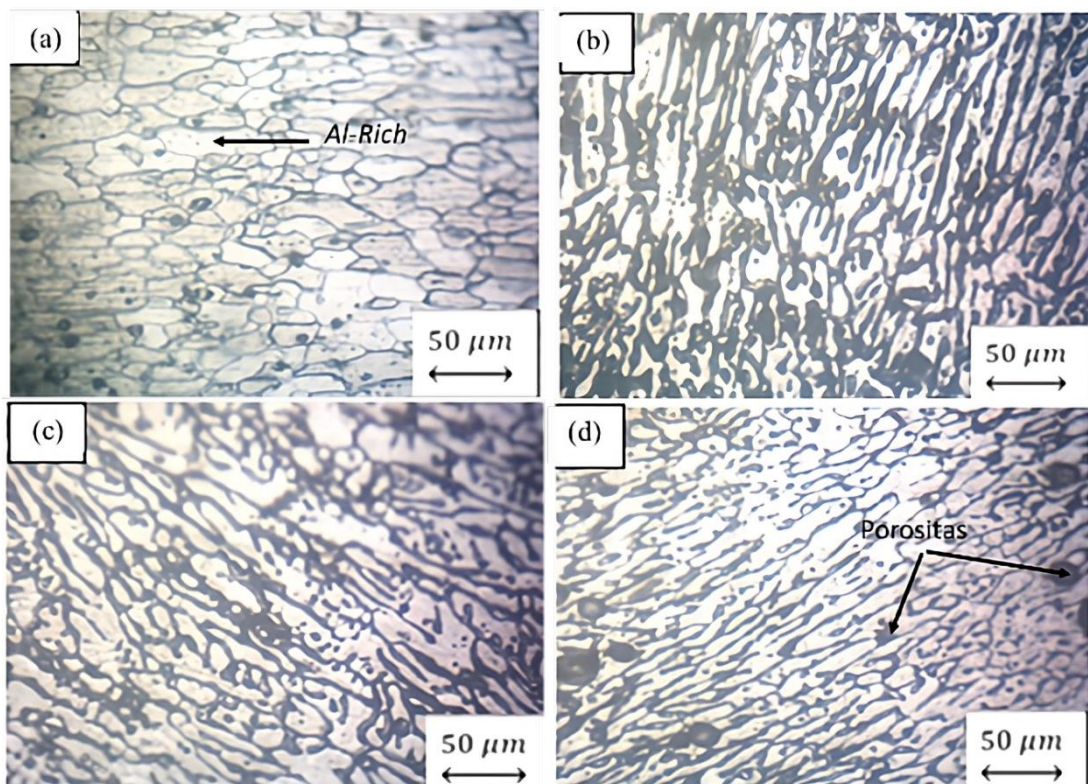
Gambar 5. Bentuk patahan sampel uji tarik sambungan las *similar join* aluminium 6061 menggunakan berbagai metode pengelasan: a) TIG, b) MIG, dan c) SMAW

Kekerasan tertinggi diperoleh untuk sambungan metode MIG dan terendah 50,7 HV pada sambungan TIG pada area *weld metal*. Sedangkan pada daerah *base metal* kekerasan tidak mengalami perubahan signifikan, dikarenakan area ini tidak mengalami perubahan struktur dikarenakan panas yang diterima selama proses pengelasan tidak signifikan. Selanjutnya, pada area HAZ kekerasan sedikit meningkat dipengaruhi adanya perubahan struktur yang diakibatkan panas yang diterima selama proses TIG dan MIG. Sebaliknya proses pengelasan MIG memperlihatkan penurunan kekerasan pada area HAZ dan *weld metal*, hal ini tentunya dipengaruhi banyak faktor diantaranya panas yang berlebih pada permukaan logam 6061 selama proses telah mendorong lebih banyak kontaminan dan porositas terbentuk di kedua area tersebut. Studi[24] menunjukkan bahwa kekerasan aluminium 6061 hasil pengelasan TIG dan MIG mengalami penurunan di daerah *weld metal* dan HAZ akibat pelunakan termal, namun dapat dipulihkan sebagian dengan pendinginan cepat atau teknik *heat treatment* tambahan.

Hubungan antara keberadaan porositas terhadap kekuatan dan kekerasan sambungan las telah dilaporkan pada pengelasan material AISI 1050 menggunakan metode SMAW[25]. Temuan ini mendukung dugaan bahwa porositas yang terbentuk selama pengelasan berperan penting dalam memengaruhi sifat mekanis hasil sambungan.



Gambar 6. Distribusi Kekerasan pada Sambungan Las Aluminium 6061-T6 Menggunakan Metode TIG, MIG, dan SMAW



Gambar 7. Mikrostruktur logam lasan aluminium 6061 pada area base metal dan HAZ dengan berbagai metode; (a) Base metal, (b) TIG, (c) MIG, dan (d) SMAW

Gambar 7 memperlihatkan hasil pengamatan visual mikrostruktur di daerah HAZ lasan 6061 untuk berbagai metode sambungan. Mikrostruktur area *base metal* terdiri dari fase Al-rich atau α -Al yang diasosiasikan dengan warna cerah pada Gambar 7a. Ukuran butir relatif besar dengan bentuk pipih. Pada daerah HAZ untuk metode TIG dan MIG terlihat struktur

mengalami perubahan yang signifikan, dimana struktur terlihat lebih kasar namun dengan ukuran butir yang lebih kecil diperoleh diperlihatkan pada Gambar 7b-c. Perubahan struktur mikro ini sangat dipengaruhi oleh besar panas yang diterima area HAZ yang tentunya berbeda dari setiap metode pengelasan yang digunakan.

Khusus untuk metode SMAW, walaupun struktur kelihatan lebih halus akan tetapi terjadi pembentukan porositas yang lebih signifikan dengan ukuran yang lebih besar $\pm 10\sim 30\mu\text{m}$, lihat Gambar 7d. Perubahan struktur mikro seperti pembentukan porositas, *weld metal*, dan *fine equaxed dendrite* pada sambungan aluminium 2A14 dipengaruhi masukan panas yang diberikan selama proses pengelasan[26]. Perubahan struktur mikro akan berdampak terhadap peningkatan kekerasan pada area HAZ dari metode TIG dan MIG, namun sedikit menurun pada area HAZ metode SMAW yang diyakini berkaitan dengan banyaknya cacat yang terbentuk pada mikrostruktur. Hal ini diperkuat oleh penelitian[27] yang mencatat bahwa proses SMAW menghasilkan lebih banyak cacat seperti porositas dan retakan panas karena tidak adanya perlindungan gas *inert* yang memadai. Sementara itu, metode TIG yang dilengkapi pelindung gas menunjukkan struktur lebih halus dan sedikit cacat.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan pengamatan visual mikrostruktur dapat dibuatkan kesimpulan sesuai dengan tujuan penelitian yang telah ditetapkan. Penggunaan teknik pengelasan MIG menghasilkan cacat yang lebih sedikit dibanding penggunaan metode TIG dan SMAW. Hasil ini berkorelasi linier dengan kekuatan Tarik sambungan aluminium 6061 tertinggi 195,4 MPa diperoleh menggunakan pengelasan MIG, sebaliknya terendah 130,6 MPa untuk pengelasan SMAW. Begitu juga halnya dengan nilai kekerasan tertinggi 63,8 HV diperoleh pada metode MIG, untuk nilai kekerasan perbedaannya tidak signifikan. Namun, nilai terendah sebesar 58,4 HV pada daerah *weld metal* diperoleh melalui penggunaan metode SMAW. Nilai sifat mekanis yang lebih rendah pada metode pengelasan SMAW diyakini berkaitan dengan struktur mikro lasan yang memiliki cacat lebih banyak seperti *hot crack*, *overlap*, dan *burn trough*. Sebaliknya, metode MIG dan TIG menunjukkan jumlah dan jenis cacat yang lebih minimal karena perlindungan gas *inert* dan kontrol parameter proses yang lebih stabil. Penelitian ini memberikan dasar ilmiah dalam memilih metode pengelasan yang sesuai untuk aplikasi struktural aluminium 6061-T6, terutama di bidang manufaktur dan konstruksi yang memerlukan kekuatan sambungan tinggi dan kualitas metalurgi baik. Penelitian lanjutan disarankan untuk pengamatan visual lebih detail terhadap mikrostruktur belum dilakukan untuk mengidentifikasi fasa, elemen penyusun, dan senyawa oksida yang terbentuk di setiap area.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis tidak lupa mengucapkan terima kasih kepada semua anggota Laboratorium Metalurgi dan Teknologi Mekanik Departemen Teknik Mesin Universitas Sumatera Utara (USU) yang telah membantu penyiapan sampel pengujian dan pengamatan visual mikrostruktur. Semua anggota Tim HORAS USU dan Pusat Riset *Alloy and Metal Processing* yang telah membantu dalam Analisa data serta diskusi yang cukup banyak selama proses penelitian ini juga penulis mengucapkan terima kasih.

REFERENSI

- [1] H. Ji, Y. Hu, R. Yu, S. Liu, W. Pei, and B. Wang, "Experimental study on TIG full welding and single pass welding quality of 6061-T6 aluminum alloy sheet," Journal

- of Materials Research and Technology, vol. 27, pp. 5965–5976, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.11.043.
- [2] B. Alzahrani, M. M. Z. Ahmed, M. I. A. Habba, R. A. Fouad, Y. G. Y. Elshaghoul, and E. A. Gadallah, “TIG Welding of EN AW-6082 Al Alloy: A Comparative Analysis of Filler Rods on Microstructural and Mechanical Performance,” *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 9, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.3390/jmmp9010021.
- [3] K. N. Gunasekaran, D. Balamurugan, M. Babin, K. J. Barath Raj, and S. Arun, “Influence of Pitting Corrosion on TIG Welded Joints of AA2024 Aluminum Alloy Joints,” in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Nov. 2021, pp. 1–5. doi: 10.1088/1742-6596/2115/1/012052.
- [4] Y. Dubey, P. Sharma, and M. P. Singh, “Effect of TIG welding on Al Alloy, Mg Alloy, and Stainless Steel-A Review,” *International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 808–821, 2022.
- [5] E. Fracchia, F. Gobber, and M. Rosso, “About weldability and welding of Al alloys: case study and problem solving,” *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 85, no. 2, pp. 67–74, Dec. 2017.
- [6] Jeyaprakash N, A. Haile, and Arunprasath M, “The Parameters and Equipments Used in TIG Welding: A Review,” *The International Journal Of Engineering And Science (IJES)* ||, vol. 4, no. 2, pp. 11–20, 2015, [Online]. Available: www.theijes.com
- [7] S. R. Bintoro, E. Putri, A. Suhartono, N. Muhayat, M. Badaruddin M, F. Fauzan, and T. Triyono, “Effect of welding environment on fatigue crack growth rate of aluminium alloy 1100,” *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 122, no. 2, pp. 49–60, 2024, doi: 10.5604/01.3001.0054.4848.
- [8] G. Qu, W. Guo, H. Zhang, Z. Shen, L. Zhang, W. Dai, J. Xiao, J. Xue, H. Zhu, M. Li, and X. Ren, “Stress Corrosion Behavior of MIG Welded Joints of 6082-T6 Aluminum Alloy at Different Temperatures,” *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, vol. 37, no. 1, pp. 1–10, Dec. 2024, doi: 10.1186/s10033-024-01104-7.
- [9] K. Dudzik and M. Czechowski, “The Cracking of Al-Mg Alloys Welded by MIG and FSW under Slow Strain Rating,” *Materials*, vol. 16, no. 7, pp. 1–17, Apr. 2023, doi: 10.3390/ma16072643.
- [10] E. Mahdi, E. Eltai, F. G. Alabtah, and F. F. Eliyan, “Mechanical Characterization of AA 6061-T6 MIG Welded Aluminum Alloys Using a Robotic Arm,” *Key Eng Mater*, vol. 913 KEM, pp. 271–278, Mar. 2022, doi: 10.4028/p-rhrr3n.
- [11] J. Aldo and R. S. Rahmany, “Analisis Pengaruh Temperatur Media Pendingin Proses Pengelasan SMAW Terhadap Nilai Kekerasan Baja Karbon Sedang,” *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, vol. 7, no. 2, pp. 73–82, Sep. 2022, doi: 10.20527/sjmekinematika.v7i2.226.
- [12] A. Syarief and Baramsyah, “Pengaruh Variasi Pendingin Terhadap Kekuatan Bending Pada Pengelasan Tee Joint Equalizer Type York Trailer,” vol. 4, no. 1, pp. 57–66, 2019.
- [13] E. Pranatal, N. Fernaldinatan, N. Prasetya Wardhani, and A. Kurniawan Yusim, “Analysis Of Pre-Heating Temperature Effect On Shielded Metal Arc Welding (SMAW) Of BKI Grade (KI-A) Plates to The Tensile Strength and Hardness,” *Journal of Applied Sciences, Management and Engineering Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 45–53, 2023.
- [14] A. Kumar, S. S. Gautam, and A. Kumar, “Heat Input & Joint Efficiency Of Three Welding Processes TIG, MIG And FSW Using AA6061,” *Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res*, pp. 89–94, 2014, [Online]. Available: www.ijmerr.com

- [15] M. A. Reddy, C. Naveen, T. Venu, G. Reddy, H. Manjar, and U. G. Student, "Analysis of the SMAW method's usage in the fabrication of shielded metals like aluminum and bronze," *International Journal of Research and Analytical Reviews*, vol. 4, no. 4, pp. 373–376, 2017, [Online]. Available: www.ijrar.org
- [16] KINGYEAR, "Mill Certificate," May 2019.
- [17] B. Alzahrani, M. M. Z. Ahmed, M. I. A. Habba, R. A. Fouad, Y. G. Y. Elshaghoul, and E. A. Gadallah, "TIG Welding of EN AW-6082 Al Alloy: A Comparative Analysis of Filler Rods on Microstructural and Mechanical Performance," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 9, no. 1, pp. 1–17, Jan. 2025, doi: 10.3390/jmmp9010021.
- [18] Y. Lee, S. Park, J. Seon, H. Han, K. Lee, and N. Kang, "Overcoming underfill defect with undermatching filler and establishing new acceptance criteria for underfill depth in laser beam welding of ultra-high strength steels," *Welding in the World*, vol. 68, no. 2, pp. 259–271, Feb. 2024, doi: 10.1007/s40194-023-01671-8.
- [19] K. Rakhi, S. Kang, and J. Shin, "Hot-Cracking Mechanism of Laser Welding of Aluminum Alloy 6061 in Lap Joint Configuration," *Materials*, vol. 16, no. 19, Oct. 2023, doi: 10.3390/ma16196426.
- [20] Aljufri and I. Mawardi, "Analysis of Defects in SMAW Welding Joint Using E 7016 Electrode Due To the Direct Cooling Process," *Journal of Welding Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 48–54, 2022.
- [21] W. M. H. Wan Mohd Nazre, S. Y. M Amin, M. N. F. Kamisan, and M. S. K. Mohd Rizal, "Porosity Scale Evaluation of Shielded Metal Arc Welding (SMAW) Specimen using Dye Penetrant Testing," *Journal of Advanced Mechanical Engineering Applications*, vol. 5, no. 2, p. 1, Dec. 2024, doi: 10.30880/jamea.2024.05.02.001.
- [22] A. P. Reddy and S. Dewangan, "A Comparative Analysis Among the Welded Al-6061 Plates Joined by Fsw, Mig And Tig Welding Methods," *Acta Metallurgica Slovaca*, vol. 29, no. 2, pp. 75–81, Jun. 2023, doi: 10.36547/ams.29.2.1778.
- [23] B. Wang, S. Xue, C. Ma, J. Wang, and Z. Lin, "Effects of porosity, heat input and post-weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of TIG welded joints of aa6082-t6," *Metals (Basel)*, vol. 7, no. 11, pp. 1–17, Nov. 2017, doi: 10.3390/met7110463.
- [24] B. Harjanto, "Kaji Banding Kualitas Repair Welding Dengan Metode Oxy-Acetylen, TIG dan MIG pada Cast Wheel Aluminium," *Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik dan Kejuruan*, vol. 12, no. 1, p. 38, Jan. 2019, doi: 10.20961/jiptek.v12i1.28254.
- [25] Aljufri and Putra Reza, "Pengaruh Porositas Las Terhadap Kekuatan Tarik Pada Material AISI 1050 Yang Menggunakan Kampuh Las V 90o," in *Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, Jakarta: Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jakarta, 2018, pp. 1–7.
- [26] Y. Zhao, F. Chen, S. Cao, C. Chen, and R. Xie, "Effect of CMT Welding Heat Input on Microstructure and Properties of 2A14 Aluminum Alloy Joint," *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 12, Dec. 2022, doi: 10.3390/met12122100.
- [27] R. P. Manihuruk, "Pengaruh Variasi Kuat Arus Pada Pengelasan Baja Aisi 1050 Terhadap Karakteristik Baja dengan Menggunakan Metode Las SMAW dan TIG," *DINAMIS*, vol. 8, no. 1, p. 7, Jun. 2020, doi: 10.32734/dinamis.v8i1.8458.