

ANALISA PENGARUH ARUS PENGELASAN ALUMINIUM MENGGUNAKAN METODE PENGELASAN TIG DENGAN ELEKTRODA ER4043 TERHADAP SIFAT MEKANIK

Analysis Of The Effect Of Aluminum Welding Current Using The Tig Welding Method With Er4043 Electrode On Mechanical Properties

Suparno¹, Hasan Basri², Wiranto Putra Pratama Simorangkir³

^{1,2} Dosen Jurusan Teknik Mesin, Prodi Teknik Mesin Produksi dan Perawatan, Politeknik Negeri Samarinda,

³ Mahasiswa, Prodi Teknik Mesin Produksi dan Perawatan, Politeknik Negeri Samarinda,

Jl.Dr.Ciptomangunkusumo Kampus Gunung Lipan, Samarinda Seberang, Kota Samarinda

e-mail: ¹suparno@polnes.ac.id, ²hasan_bsr@polnes.ac.id, ³wiranto_pps567@gmail.com

Info Artikel

Riwayat Artikel:

Diterima: 05/03/2026

Diterima dalam bentuk revisi:

25/04/2026

Diteima/publis: 25/05/2026

Kata Kunci

TIG Welding, Aluminium, Welding Current

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi arus pengelasan dalam proses pengelasan TIG terhadap sifat mekanik sambungan aluminium Seri 3 yang digunakan dalam aplikasi radiator. Proses pengelasan dilakukan dengan menggunakan tiga tingkat arus yang berbeda: 115 A, 120 A, dan 125 A. Pengujian tersebut meliputi pengujian tarik, pengujian kekerasan Vickers, dan analisis mikrostruktural menggunakan mikroskop optik dan perangkat lunak ImageJ. Hasil uji tarik menunjukkan bahwa peningkatan arus pengelasan umumnya menyebabkan kekuatan tarik yang lebih tinggi tetapi mengurangi keuletan. Uji kekerasan mengungkapkan bahwa zona las memiliki kekerasan tertinggi dibandingkan dengan HAZ dan logam dasar. Pengamatan mikrostruktur menunjukkan perubahan signifikan dalam ukuran butir dan distribusi unsur di setiap zona karena variasi arus pengelasan. Secara keseluruhan, arus 125 A menghasilkan kekuatan tarik tertinggi, meskipun menghasilkan keuletan yang lebih rendah. Temuan ini memberikan wawasan berharga dalam menentukan parameter pengelasan yang optimal untuk menghasilkan sambungan yang kuat dan berkualitas tinggi, terutama dalam pembuatan radiator

Abstract

This research aims to analyze the effect of welding current variations in the TIG welding process on the mechanical properties of Series 3 aluminum joints used in radiator applications. The welding process was carried out using three different current levels: 115 A, 120 A, and 125 A. The tests included tensile testing, Vickers hardness testing, and microstructural analysis using an optical microscope and ImageJ software. The tensile test results showed that increasing the welding current generally led to higher tensile strength but reduced ductility. The hardness test revealed that the weld zone had the highest hardness compared to the HAZ and base metal. Microstructural observations indicated significant changes in grain size and elemental distribution in each zone due to variations in welding current. Overall, the 125 A current produced the highest tensile strength, although it resulted in lower ductility. These findings provide valuable insights into determining optimal welding parameters to produce strong and high-quality joints, particularly in aluminum radiator manufacturing.

PENDAHULUAN

Dalam industri manufaktur, pengelasan merupakan salah satu proses penyambungan yang penting, terutama untuk komponen yang memerlukan kekuatan sambungan, ketahanan korosi, dan stabilitas mekanik yang baik. Pengelasan aluminium masih menjadi perhatian dalam penelitian manufaktur karena material ini memiliki konduktivitas termal tinggi, lapisan oksida yang stabil, serta kecenderungan mengalami porositas dan perubahan mikrostruktur selama proses penyambungan [1]. Paduan aluminium banyak digunakan dalam aplikasi otomotif dan komponen penukar panas karena memiliki densitas rendah, kemampuan bentuk yang baik, serta ketahanan korosi yang mendukung penggunaannya pada lingkungan kerja termal [2]. Pada aplikasi seperti radiator dan heat exchanger, aluminium seri 3xxx banyak digunakan karena sistem paduan Al-Mn dapat memberikan kombinasi antara ketahanan korosi, stabilitas termal, dan kemampuan fabrikasi yang baik [3].

Namun, perlu diperjelas bahwa aluminium seri 3xxx merupakan paduan berbasis Al-Mn, bukan Al-Mg. Jika material yang digunakan dalam penelitian ini adalah AA5456, maka material tersebut lebih tepat diklasifikasikan sebagai aluminium seri 5xxx berbasis magnesium. Paduan Al-Mg seperti AA5456 banyak dikaji dalam proses pengelasan TIG karena variasi parameter pengelasan dapat memengaruhi kekuatan tarik, kekerasan, dan karakteristik sambungan secara signifikan [4]. Pada komponen aluminium yang bekerja pada lingkungan korosif atau termal, karakteristik sambungan tidak hanya ditentukan oleh logam induk, tetapi juga oleh perubahan mikrostruktur dan respons daerah las terhadap kondisi proses [5].

Metode pengelasan yang umum digunakan pada paduan aluminium adalah Tungsten Inert Gas (TIG) atau Gas Tungsten Arc Welding (GTAW). Proses ini menggunakan elektroda tungsten tidak habis pakai dan gas pelindung inert untuk

melindungi kolam las dari kontaminasi atmosfer, sehingga mampu menghasilkan sambungan dengan kualitas permukaan yang baik dan kontrol panas yang relatif stabil [6]. Dalam pengelasan aluminium, penggunaan gas pelindung dan kestabilan busur sangat penting karena oksidasi, porositas, serta ketidakteraturan penetrasi dapat menurunkan kualitas sambungan [7]. Oleh sebab itu, TIG banyak dipilih untuk aplikasi yang membutuhkan sambungan bersih, presisi, dan memiliki kontrol masukan panas yang lebih baik.

Kualitas sambungan las dipengaruhi oleh parameter pengelasan, terutama arus, tegangan, kecepatan pengelasan, laju aliran gas pelindung, dan masukan panas (heat input). Variasi arus pengelasan dapat mengubah distribusi panas selama proses pengelasan, sehingga berdampak pada ukuran daerah las, pembentukan fasa, dan perubahan mikrostruktur di sekitar sambungan [8]. Peningkatan heat input dapat memperbaiki penetrasi dan fusi pada kondisi tertentu, tetapi masukan panas yang terlalu tinggi dapat memperbesar daerah terdampak panas, mempercepat pelunakan lokal, dan menurunkan sifat mekanik sambungan [9]. Selain itu, pemilihan kawat pengisi dan mode pengelasan juga berpengaruh terhadap porositas, kekuatan tarik, dan elongasi sambungan aluminium [10].

Berdasarkan hal tersebut, penelitian mengenai pengaruh variasi arus pada pengelasan TIG aluminium menjadi penting untuk menentukan parameter pengelasan yang mampu menghasilkan sambungan dengan kualitas mekanik dan mikrostruktur yang baik. Evaluasi terhadap kekuatan tarik, elongasi, kekerasan, serta morfologi daerah las dapat memberikan dasar ilmiah dalam menentukan kondisi pengelasan yang paling sesuai untuk aplikasi komponen aluminium..

TINJAUAN PUSTAKA

Gazali et al. (2022) merancang modul latih elektro-pneumatik berbasis PLC sebagai media praktikum untuk meningkatkan pemahaman mahasiswa

terhadap sistem pneumatik dan aplikasinya dalam otomasi industri [11]. Modul tersebut memadukan rangkaian pneumatik, kerangka alat, serta komponen utama seperti single-acting cylinder, double-acting cylinder, dan katup pengatur aliran udara untuk mengendalikan gerak rod piston [11]. Secara teknis, penggunaan silinder pneumatik dalam sistem elektro-pneumatik relevan karena perpindahan piston sangat bergantung pada aliran udara yang masuk ke ruang silinder dan konfigurasi katup pengendali [12]. Sistem yang dikembangkan Gazali et al. juga mendukung dua mode operasi, yaitu mode otomatis melalui tombol auto dan mode manual melalui perintah gerak kanan-kiri, sehingga menunjukkan integrasi antara logika PLC dan aktuator pneumatik pada perangkat latih [11]. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip otomasi elektro-pneumatik modern, di mana pengendalian katup, tekanan, dan respons aktuator menjadi faktor penting dalam meningkatkan akurasi gerak serta efisiensi sistem [13], [14].

METODOLOGI PERANCANGAN

Pada penelitian ini dimulai dengan tahapan studi literatur, yaitu mengumpulkan dari berbagai referensi mengenai variasi arus dan pengelasan TIG, variasi arus hingga pengaruh terhadap sifat mekaniknya. Pada tahap ini dimulai dari persiapan peralatan, serta material aluminium dan proses pengujian, seperti uji komposisi, uji tarik, uji struktur mikro, uji vickers.

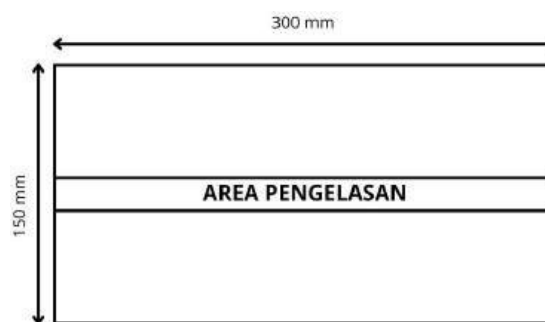
Pada tahap ini material akan dilas dengan ukuran material 30 mm x 15 mm tebal 3mm dengan variasi arus 115 A, 120 A, 125 A, dengan menggunakan metode Tungsten Inert Gas (TIG) pada posisi 1G. Variasi arus pada pengelasan yang digunakan bertujuan untuk menentukan arus yang paling optimal.



Gambar 1. Diagram Alir

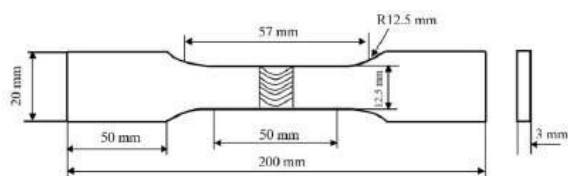
Bahan Penelitian

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah aluminium seri 3 dengan ukuran plat 300 mm x 150 mm dengan tebal 3 mm. Penggunaan aluminium seri 3 dikarenakan sifatnya yang tahan korosi serta mudah dilas. Komposisi pada aluminium ini telah dilakukan pengujian dengan Optical Emission Spectroscopy (OES).



Gambar 2. Dimensi Spesimen Las

Proses pengelasan dilakukan menggunakan mesin TIG 200 ACDC, yang bisa digunakan untuk las TIG AC (Alternating Current) maupun DC (Direct Current). Setelah proses pengelasan selesai, maka specimen akan dipotong dengan gerinda tangan untuk pengujian tarik, mikro dan kekerasan, dengan berdasar pada ASTM E8.

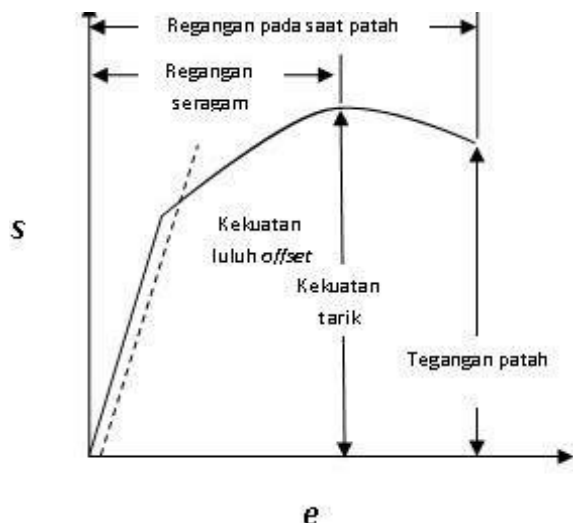


Gambar 3. Spesimen Uji Tarik

Setelah pengujian yang dilakukan sebanyak tiga kali pada masing-masing arus, maka hasil pengujian akan dikumpulkan dan dianalisis.

Pengujian Uji Tarik

Pengujian uji tarik dilakukan pada material dengan memberikan beban tarik yang meningkat secara bertahap hingga mengalami patahan (fracture).



Gambar 4. Grafik Tegangan Regangan

Pengujian Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro dilakukan dengan metode metalografi, dilakukan dengan tujuan dengan tujuan untuk mengetahui daerah yang terkena dampak dari pengelasan pada area Heat Affected Zone (HAZ), Weld Metal (WM), serta Base Metal (BM). Dengan menggunakan perangkat lunak ImageJ untuk memfokuskan pengamatan dan mengamati perbedaan perbandingan morfologi dan persentase Al dan Mg akibat pengelasan.

Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan (Vickers) dilakukan pada masing-masing area pada 31 titik dengan jarak antar titik 1mm. Beban yang digunakan sebesar 100 gram dengan durasi penekanan selama 15 detik, nilai kekerasan dihitung dengan menggunakan rumus:

$$HV = 1.854 \frac{F(kgf)}{D^2(mm)}$$

Dimana F merupakan beban dalam kgf, dan D adalah panjang diagonal rata-rata dari penekanan dengan satuan mm

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Uji Komposisi

Uji komposisi yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui spesifikasi material yang diuji dan unsur kandungan didalamnya. Pada hasil uji komposisi menunjukkan bahwa kandungan yang terdapat didalamnya menunjukkan spesifikasi seri 3, terdapat unsur kandungan yang ada didalamnya mengandung besi (Fe), silikon (Si), Tembaga (Cu), Magnesium (Mg), Mangan (Mn), serta unsur pendukung lainnya. Melalui uji Optical Emission Spectroscopy (OES) didapat unsur yang terkandung di dalam aluminium seri 3 yang ditampilkan pada tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Material

Unsur	Kadar %
Aluminium (Al)	98.69
Besi (Fe)	0.705
Tembaga (Cu)	0.089
Silikon (Si)	0.17
Magnesium (Mg)	0.0065
Mangan (Mn)	0.043
Timbal (Pb)	0.061
Seng (Zn)	0.0097

Pengujian Metalografi

Melalui pengujian metalografi untuk mengetahui struktur mikro pada area weld, haz, dan base metal aluminium seri 3 maka didapatkan data yang seperti yang ditampilkan pada gambar 5, gambar 6, gambar 7.



a



b



c

Gambar 5. Struktur Mikro 115 A (a) Base Metal (b) HAZ (c) Weld Metal

Hasil pada uji mikro struktur menunjukkan bahwa pada Base Metal, kandungan aluminium sebesar 81,057% dan Mn sebesar 18,943%, yang menunjukkan komposisi yang masih mendekati komposisi asli dari paduan seri 3. Pada zona HAZ, kandungan aluminium meningkat menjadi 84,818%, sedangkan Mn menurun menjadi 15,182%, yang mengindikasikan adanya sedikit penguapan unsur Mg akibat suhu tinggi selama proses pengelasan. Di Weld Metal, kandungan aluminium kembali menurun menjadi 79,683%, sedangkan Mn meningkat

menjadi 20,317%, yang kemungkinan besar disebabkan oleh unsur selama proses pencairan dan pembekuan logam las.



a



b



c

Gambar 6. Struktur Mikro 120 A (a) Base Metal (b) HAZ (c) Weld Metal

Base Metal mengandung 75,61% Al dan 24,39% Mn. Ada penurunan Aluminium dan kenaikan Magnesium, mungkin karena perubahan lokal saat pengelasan. Pada zona HAZ menunjukkan 73,90% Al dan 26,10% Mn. Menandakan bahwa terdapat lebih banyak mangan yang masuk pada zona HAZ dikarenakan suhu yang tinggi. Sedangkan di area Weld Metal

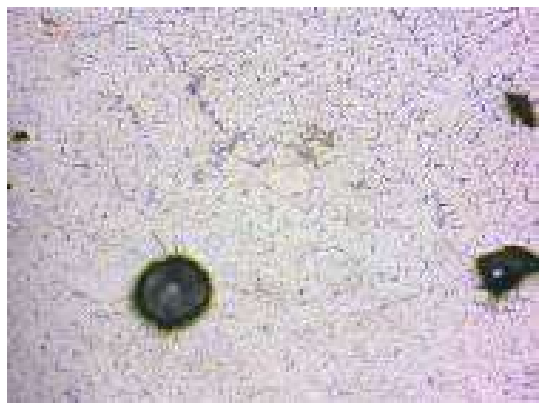
menunjukkan terjadinya perubahan yang mendekati kondisi awal logam sebelum dilas dengan 81,95% Al dan 18,04% Mn.



a



b



c

Gambar 7. Struktur Mikro 125 A (a) Base Metal (b) HAZ (c) Weld Metal

Pada arus 125A menunjukkan kandungan 75,77% Al dan 24,23% Mn. Pada HAZ menunjukkan kenaikan pada aluminium dengan 80,118% Al dan 19,882 Mn. Sedangkan di Weld Metal kandungan aluminium menjadi 82,953% Al dan 17,047% Mn.

Dari ketiga variasi arus, terlihat bahwa peningkatan arus menyebabkan perubahan

pada mikrostruktur, terutama di zona HAZ dan weld metal. Semakin tinggi arus, maka semakin tinggi juga ukuran butir. Zona HAZ merupakan titik yang paling sensitif karena berada diantara dasar logam dan las yang rentan terhadap perubahan sifat mekanik.

Pengujian Tarik

Dari hasil pengujian uji tarik yang telah dilakukan, maka didapat hasil data yang dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Data Hasil Uji Tarik

Heat Input (Ampere)	σ_{max} (MPa)	Yield Strength (MPa)
115	126.11	52.07
120	124.02	66.72
125	131.98	84.51

Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa pada arus 115 A diperoleh nilai maksimum ultimate tensile strength sebesar 126.11 MPa dengan yield strength 61.56 MPa. Nilai ini menandakan bahwa penggunaan arus rendah menghasilkan kekuatan sambungan yang masih terbatas akibat ikatan logam yang kurang sempurna. Peningkatan arus menjadi 120 A menghasilkan ultimate tensile strength 124.03 MPa dan yield strength 66.72 MPa. Walaupun kekuatan tarik sedikit lebih rendah dibandingkan arus 115 A, nilai yield strength lebih tinggi sehingga sambungan memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap pembebanan awal. Pada arus tertinggi, yaitu 125 A, didapatkan nilai ultimate tensile strength sebesar 131.98 MPa dengan yield strength 84.52 MPa. Hasil ini memperlihatkan bahwa semakin besar arus pengelasan, kekuatan tarik cenderung meningkat, meskipun tetap dipengaruhi oleh perubahan struktur mikro akibat masukan panas yang tinggi.

Secara keseluruhan, arus 125 A memberikan hasil paling optimal dengan nilai ultimate tensile strength dan yield strength tertinggi di antara variasi arus yang diuji. Hal ini menegaskan bahwa kenaikan arus mampu memperbaiki kualitas sambungan, namun tetap memerlukan

pengendalian agar tidak menimbulkan cacat pada mikrostruktur material.

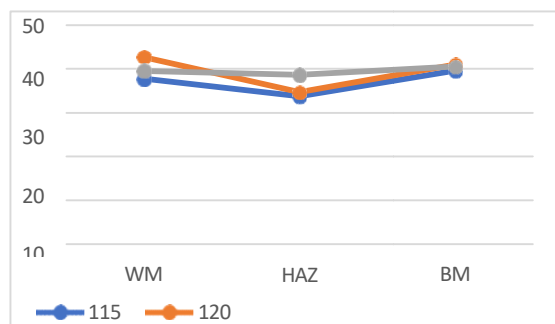
Pengujian Kekerasan Vickers

Dari pengujian vickers yang telah didapat nilai pada masing-masing area dengan nilai berbeda. Adapun nilai yang dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Rata-rata Nilai Uji kekerasan

Arus	Daerah	Rata-rata HV
115 A	WM	37,83
	HAZ	33,75
	BM	39,6
120 A	WM	42,7
	HAZ	34,7
	BM	40,99
125 A	WM	39,51
	HAZ	38,64
	BM	40,57

Pengujian kekerasan vickers memperlihatkan bahwa pada semua variasi arus, daerah weld metal selalu mencatat nilai tertinggi, sedangkan HAZ menjadi area dengan nilai terendah. Pada arus 115 A, rata-rata kekerasan weld metal tercatat 43.7 HV, lebih besar dibandingkan base metal sebesar 37.2 HV dan HAZ sebesar 33.8 HV. Saat arus dinaikkan menjadi 120 A, nilai rata-rata kekerasan weld metal meningkat menjadi 47.1 HV, sementara nilai pada HAZ menurun hingga 30.6 HV. Selanjutnya, pada arus 125 A, kekerasan di weld metal kembali mengalami kenaikan hingga mencapai 50.4 HV, sedangkan HAZ tetap menunjukkan nilai terendah yaitu 29.8 HV.



Gambar 8. Grafik uji tarik

Secara umum, hasil ini memperlihatkan bahwa semakin besar arus pengelasan, kekerasan di daerah las meningkat, namun daerah HAZ cenderung melemah akibat pembesaran butir. Hal ini menegaskan bahwa masukan panas berpengaruh langsung terhadap distribusi kekerasan pada sambungan material.

KESIMPULAN

Pada penelitian ini menganalisis kekuatan tarik, struktur mikro dan kekerasan aluminium seri 3 dengan variasi arus pengelasan. Hasil analisis menunjukkan bahwa adanya variasi arus membuat adanya pengaruh terhadap sifat mekanik material.

Berdasarkan hasil penelitian, dapat dirumuskan beberapa kesimpulan. Pada uji tarik, peningkatan arus pengelasan TIG berbanding lurus dengan kenaikan nilai ultimate tensile strength dan yield strength. Arus 125 A menghasilkan nilai tertinggi, meskipun kekuatannya masih belum sepenuhnya menyamai material induk.

Pengamatan struktur mikro memperlihatkan bahwa semakin besar arus yang digunakan, ukuran butir di daerah HAZ cenderung membesar akibat tingginya masukan panas. Sementara itu, pada daerah weld metal terbentuk struktur lebih padat karena proses pembekuan logam cair yang berlangsung cepat.

Hasil uji kekerasan Vickers menunjukkan pola serupa pada semua variasi arus, yaitu nilai tertinggi terdapat pada weld metal sedangkan yang terendah berada di HAZ. Dengan bertambahnya arus, kekerasan di daerah las meningkat, namun kekerasan di HAZ justru menurun akibat pertumbuhan butir yang lebih kasar.

Secara umum, penggunaan arus 125 A dapat dianggap paling optimal karena mampu menghasilkan sambungan dengan kekuatan tarik dan kekerasan lebih baik dibandingkan variasi arus lainnya, walaupun pengaruh panas yang tinggi tetap perlu diperhatikan agar tidak menurunkan keseragaman maupun keuletan pada daerah HAZ.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. P. Verma, K. N. Pandey, K. András, R. Khargotra, and T. Singh, "Difficulties and redressal in joining of aluminium alloys by GMA and GTA welding: a review," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 23, pp. 2576–2586, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.01.183.
- [2] J. Yang, F. Zhao, W. Huang, D. Zhu, and K. Li, "Effect of Al–Fe–Mn–Si particle characteristics on the growth morphology and corrosion resistance of anodic oxide film on AA 3003 aluminium alloy," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 315, p. 128863, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.matchemphys.2023.128863.
- [3] S. Kahl, H.-E. Ekström, and J. Mendoza, "Tensile, Fatigue, and Creep Properties of Aluminum Heat Exchanger Tube Alloys for Temperatures from 293 K to 573 K (20 °C to 300 °C)," *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 45, no. 2, pp. 663–681, Feb. 2014, doi: 10.1007/s11661-013-2003-5.
- [4] A. Kumar and S. Sundarrajan, "Optimization of pulsed TIG welding process parameters on mechanical properties of AA 5456 Aluminum alloy weldments," *Mater. Des.*, vol. 30, no. 4, pp. 1288–1297, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2008.06.055.
- [5] J. Wang, X. Ling, W. Zhang, X. Lu, and C. Chen, "Microstructures and mechanical properties of friction stir welded butt joints of 3003-H112 aluminum alloy to 304 stainless steel used in plate-fin heat exchanger," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 21, pp. 3086–3097, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.10.161.
- [6] M. Samiuddin, J. Li, M. Taimoor, M. N. Siddiqui, S. U. Siddiqui, and J. Xiong, "Investigation on the process parameters of TIG-welded aluminum alloy through mechanical and microstructural characterization," *Def. Technol.*, vol. 17, no. 4, pp. 1234–1248, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.dt.2020.06.012.
- [7] A. Hasanniah and M. Movahedi, "Welding of Al-Mg aluminum alloy to aluminum clad steel sheet using pulsed gas tungsten arc process," *J. Manuf. Process.*, vol. 31, pp. 494–501, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2017.12.008.
- [8] Y. Liang, J. Shen, S. Hu, H. Wang, and J. Pang, "Effect of TIG current on microstructural and mechanical properties of 6061-T6 aluminium alloy joints by TIG–CMT hybrid welding," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 255, pp. 161–174, May 2018, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.12.006.
- [9] W. Guo, X. Zhao, Y. Zhao, Y. Liu, H. Li, and B. Han, "Research on optimal heat input parameter for TIG welding of thin plate 5083 aluminum alloy," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 15593, May 2025, doi: 10.1038/s41598-025-99836-6.
- [10] Z. Xue *et al.*, "Effect of welding wires on the microstructures and mechanical properties of TIG-welded Al-Cu-Mg alloys," *Mater. Des.*, vol. 260, p. 115278, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.matdes.2025.115278.
- [11] R. Gazali, L. Fedianto, P. Permana, and U. Utomo, "PERANCANGAN MODUL LATIH ELEKTRO PNEUMATIC BERBASIS PLC," *JEIS J. ELEKTRO DAN Inform. SWADHARMA*, vol. 2, no. 2, pp. 49–54, Jul. 2022, doi: 10.56486/jeis.vol2no2.224.
- [12] B. Najjari, S. M. Barakati, A. Mohammadi, M. J. Futuhi, and M. Bostanian, "Position control of an electro-pneumatic system based on PWM technique and FLC," *ISA Trans.*, vol. 53, no. 2, pp. 647–657, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.isatra.2013.12.023.
- [13] Z. Lin *et al.*, "Enhanced energy conservation and response accuracy of a pneumatic control system,"

- iScience*, vol. 27, no. 9, p. 110797, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.isci.2024.110797.
- [14] J. Pustavrh, M. Hočevár, P. Podržaj, A. Trajkovski, and F. Majdič, "Comparison of hydraulic, pneumatic and electric linear actuation systems," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, p. 20938, Nov. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-47602-x.