

Effect of travel speed and arc length on geometry and heat accumulation in the WAAM-GMAW process

Agus Sifa^a, Ario Sunar Baskoro^{a1}, Afrizal Riyantono^a, Faza Khoirina^a, Gandjar Kiswanto^a, Syarif Junaidi^b

^aDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Kampus UI Depok, Indonesia, 16424

^bDepartment of Mechanical and Nuclear Engineering, College of Engineering, University of Sharjah, PO Box:27272, Sharjah, UAE

¹Email korespondensi: ario@eng.ui.ac.id

Abstract. Wire arc Additive Manufacturing (WAAM) is a technology capable of manufacturing large, complex aluminum alloy components. This is due to its high deposition rate and efficient material utilization. However, WAAM faces several issues, particularly regarding process stability. In the WAAM process, especially when using Gas Metal Arc Welding (GMAW), stability is largely determined by controllable process parameters such as travel speed and arc length. This study aims to clarify how fusion stability, influenced by travel speed and arc length, affects the resulting deposit geometry and heat accumulation. The experimental method involved conducting a single-layer WAAM process using GMAW, with ER5356 filler (diameter 1 mm) and AA6061 substrate. During the single-layer WAAM GMAW process, the temperature and current were measured in real time on the deposit. The results included minimum and maximum height and width measurements of the deposits produced. Increasing the travel speed reduced the current, thereby lowering the heat input. Heat accumulation, under fixed parameters of 80 A current, 16 V voltage, and varying travel speeds and arc lengths, fluctuated throughout the process. At an arc length of 6 mm, the single-layer deposit geometry exhibited humping, causing irregular widths and heights. Overall, both travel speed and arc length played significant roles in determining the maximum and minimum heights of the deposits.

Keywords: WAAM GMAW, single layer, ER5356, Travel Speed, Geometry

Received: September 30, 2025; **Presented:** 9 October 2025; **Publication:** 9 March 2026

DOI: <https://doi.org/10.71452/88detg63>

PENDAHULUAN

Teknologi manufaktur aditif (AM), dengan kata lain "manufaktur berlapis" atau "teknologi 3D printer" telah berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir [1]. *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM) memperluas manfaat dari fabrikasi lapis demi lapis pada komponen sedang hingga komponen besar dengan kompleksitas geometri rendah [2]. Kelebihan dari teknologi WAAM adalah kemampuan untuk membuat bagian besar dengan tingkat deposisi yang lebih tinggi dibandingkan dengan teknologi AM lainnya [3]. WAAM memiliki fitur luar biasa seperti biaya lebih rendah dan efisiensi lebih tinggi daripada yang lain. Sistem perangkat keras WAAM berdasarkan sumber panas tertentu memiliki karakteristik yang mirip dengan teknologi pengelasan yang sama [4].

WAAM merupakan teknologi yang mampu melakukan proses pembuatan komponen besar dan kompleks dengan menggunakan paduan aluminium karena tingkat deposisi dan pemanfaatan materialnya yang tinggi, namun memiliki banyak masalah. Hasil WAAM paduan aluminium sering kali mengandung banyak cacat metalurgi seperti *porositas*, retakan, dan terak. Cacat hasil proses WAAM yang terjadi berpengaruh pada penurunan sifat mekanik, dan struktur mikro WAAM [5]. Fabrikasi komponen paduan aluminium komponen besar menggunakan teknologi WAAM menimbulkan sifat mekanik yang buruk [6].

Aluminium memiliki bobot yang lebih kecil daripada kekuatan. Efisiensi produksi dengan busur untuk aluminium dan paduannya, *pulse arc* berbasis MIG pada proses WAAM paling cocok [7]. Michal Wieczorowski et al. [8] melakukan penelitian pada kawat ER5356 dengan metode WAAM-CMT untuk membuat dinding tipis, kemudian menganalisis stabilitas proses WAAM akibat parameter dan mengidentifikasi cacat porositas yang terjadi. Sumit K. Sharma et al. [9] menganalisis pengaruh parameter proses terhadap morfologi permukaan hasil WAAM pada kawat ER5356; permukaan paduan Al-5356 yang dikembangkan menunjukkan sifat daerah permukaan yang tidak kontinu akibat akumulasi panas pada permukaan.

WAAM dapat memungkinkan untuk mengintegrasikan substrat yang diperlukan untuk memulai pengendapan ke dalam komponen akhir. Paduan aluminium untuk pembuatan komponen yang memiliki kekuatan spesifiknya yang tinggi, toleransi terhadap kerusakan, dan sifat ketahanan terhadap korosi [10]. Secara komersial teknologi WAAM dianggap hemat biaya [11]. Pengelasan busur logam gas (GMAW) umumnya digunakan untuk menyambung berbagai macam logam. Baru-baru ini telah diterapkan pada WAAM berbasis GMAW (WAAM-GMAW), karena berbiaya rendah dan efisiensi tinggi [12].

Berdasarkan permasalahan yang ada, beberapa parameter yang memengaruhi stabilitas fusi selama

proses pengendapan single layer WAAM GMAW, terutama kecepatan pergerakan torch/travel speed dan arc length. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dampak penggunaan parameter travel speed dan arc length terhadap geometri dan akumulasi panas.

METODOLOGI

Metode

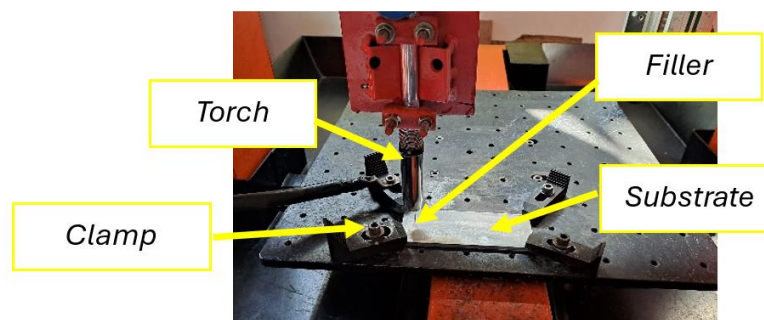
Proses WAAM GMAW single layer dilakukan dengan setting seperti Gambar 1. Substrate diclamp dengan empat clamping di ujung sisinya, posisi torch didekatkan pada permukaan substrate dengan arc length 2, 4, dan 6 mm, dan contact tip work distance (CTWD) sebesar 20 mm, dengan parameter setting seperti disajikan pada Tabel 1. Proses eksperimen dilakukan pada mesin las otomatis berbasis CNC 3-axis dan menggunakan argon 99,9%. Mesin las GMAW dengan tipe BLU PAK 35 Miller. Selama proses WAAM GMAW dilakukan perekaman arus

dengan clamp meter Flux i1010 dan data collector Vast DC 23, dan pengukuran temperatur dengan infrared thermometer.

Sebelum dilakukan proses single-layer WAAM GMAW, terlebih dahulu dilakukan setting parameter dan mesin. Kemudian, perhitungan heat input dengan parameter yang digunakan disajikan pada Tabel 1 untuk melakukan perhitungan heat input dengan Persamaan 1. Sumber panas untuk proses WAAM GMAW dengan parameter yang mempengaruhi berupa arus(A), Tegangan (V) dan kecepatan endapan (mm/s) serta dipengaruhi efisiensi process (K)=0,8 [13], maka sumber panas Q (kJ/mm), dan travel speed (TS) ditunjukkan pada persamaan 1 [14], [13].

Material

Proses eksperimen WAAM GMAW single layer menggunakan material filler ER5356 dengan diameter 1 mm dan substrate AA6061, dengan dimensi substrate 150 mm x 60 mm x 6 mm, dan komposisi material filler dan substrate disajikan pada Tabel 2.



Gambar 1. Setting proses WAAM GMAW single layer

$$Q = K \frac{VI}{TS} \times 10^{-3} \quad (1)$$

Tabel 1. Parameter Proses WAAM GMAW single layer

No.	Travel Speed (mm/min)	Travel Speed (mm/s)	Flow rate (L/Min)	Arc Length (mm)	WFS (m/min)	Arus (A)	Tegangan(V)	CTWD (mm)	Heat Input (J/mm)
1.	100	1,67	15	2	3	80	16	20	614,4
2.	100	1,67	15	4	3	80	16	20	614,4
3.	100	1,67	15	6	3	80	16	20	614,4
4.	120	2,00	15	2	3	80	16	20	512,0
5.	120	2,00	15	4	3	80	16	20	512,0
6.	120	2,00	15	6	3	80	16	20	512,0
7.	140	2,33	15	2	3	80	16	20	438,9
8.	140	2,33	15	4	3	80	16	20	438,9
9.	140	2,33	15	6	3	80	16	20	438,9

Tabel 2. Komposisi material *filler* dan *substrate*

Komponen	Material	Al	Si	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn
Filler	ER5356[15]	Bal.	0,25	0,10	0,40	5,0	0,05-0,2	0,10
Substate	AA 6061[16]	Bal.	1.0	0.2	0.30	0.9	0.1	0.2

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 2, menyajikan pasca proses WAAM GMAW untuk proses pendinginan alami dan perekaman temperatur sampai pada temperatur lingkungan. Adapun hasil proses *single-layer* WAAM GMAW disajikan pada Gambar 3.

Gambar 3 menyajikan secara visual hasil proses *single-layer* WAAM GMAW dengan variasi parameter *travel speed*. Pada *arc length* 2 dan 4 mm, lebarnya beraturan, dan pada *arc length* 6 mm, lebarnya tidak beraturan dan terjadi *humping*. *humping* terjadi akibat adanya gravitasi dan *travel speed* yang berlebih [17], yang mengakibatkan pengerasan *premature*, tekanan busur yang terjadi lebih tinggi dari kolam lelehan, fenomena *humping* dipengaruhi oleh *travel speed*, semakin besar *molten pool* maka semakin tinggi potensi terjadinya *humping* [18]. Kestabilan fusi dan keragaman bentuk endapan dipengaruhi oleh *arc length*[19].

Arus

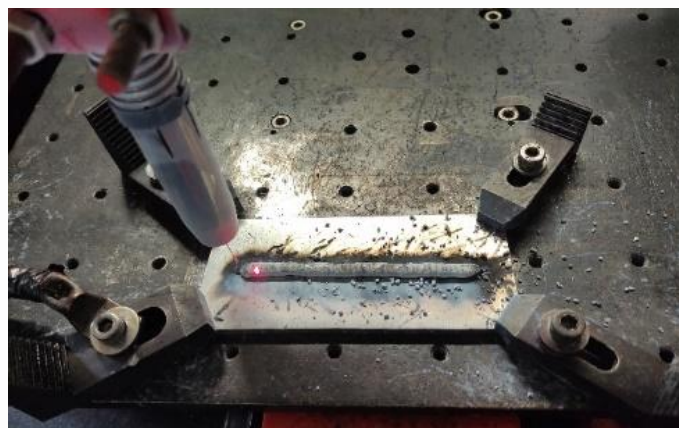
Arus mempunyai peranan yang cukup besar dalam proses GMAW-AM, yaitu merepresentasikan *input* panas [20].

Gambar 4 menyajikan hasil perekaman arus secara real time, di mana sinyal arus pada Gambar 4(a)

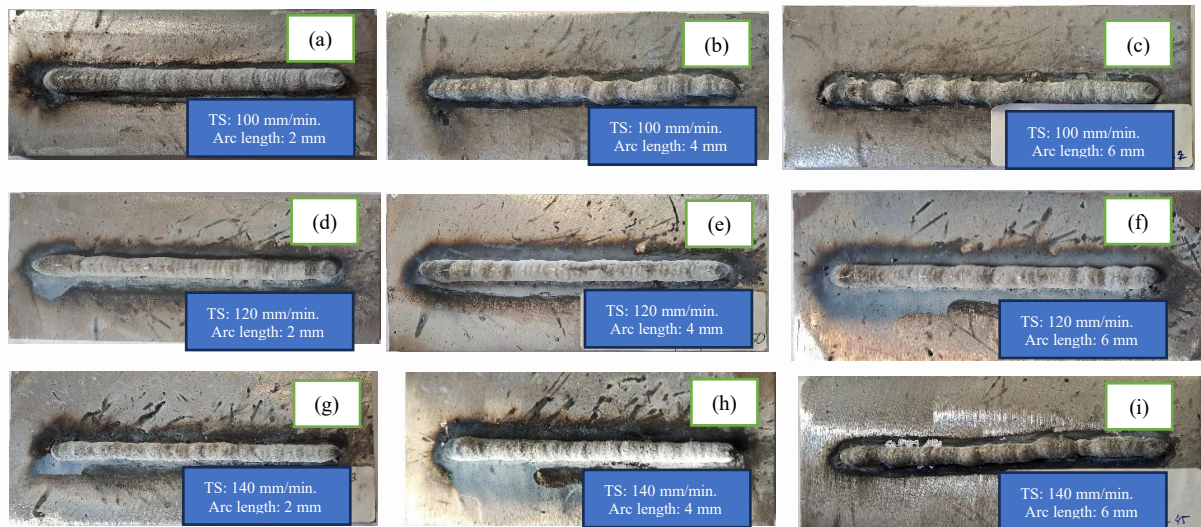
menunjukkan arus yang terjadi selama proses WAAM GMAW. Kemudian diambil rata-rata arus pada masing-masing parameter yang digunakan. Rata-rata arus yang terjadi selama proses *single-layer* WAAM GMAW disajikan pada Gambar 4(b). Pada masing-masing *travel speed* dengan *arc length* yang berbeda, besar arus rata-rata sama pada masing-masing *arc length*, namun memiliki perbedaan pada rata-rata arus pada masing-masing *travel speed*, di mana semakin tinggi *travel speed*, maka arus yang terjadi semakin kecil. Dimana grafik dengan perbedaan *travel speed* menunjukkan adanya penurunan arus akibat *travel speed* dan berdampak pada penurunan *heat input*[21].

Akumulasi Panas

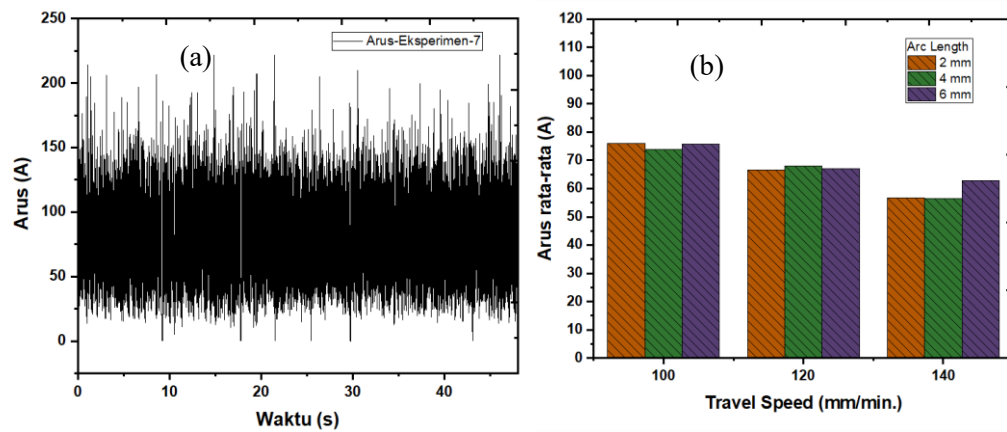
Panas akumulasi selama proses WAAMGMAW disajikan pada Gambar 5. Fenomena panas akumulasi pada proses WAAM GMAW terjadi dari awal proses selama 60 detik. Disajikan pada Gambar 5(a), terjadi akumulasi hingga nilai puncak 464 °C, kemudian dilakukan proses pendinginan secara alami dengan udara lingkungan selama 840 detik. Gambar 5(b) menunjukkan terjadinya akumulasi panas, di mana panas akumulasi pada *travel speed* 100 mm/min, dan 140 mm/min. Terjadi fluktuasi, namun pada *travel speed* 120 mm/min. Terjadi penurunan akibat perbedaan *arc length*. Semakin tinggi *arc length*, semakin rendah akumulasi panas. Panas fusi yang terakumulasi berdampak pada geometri manik[22].



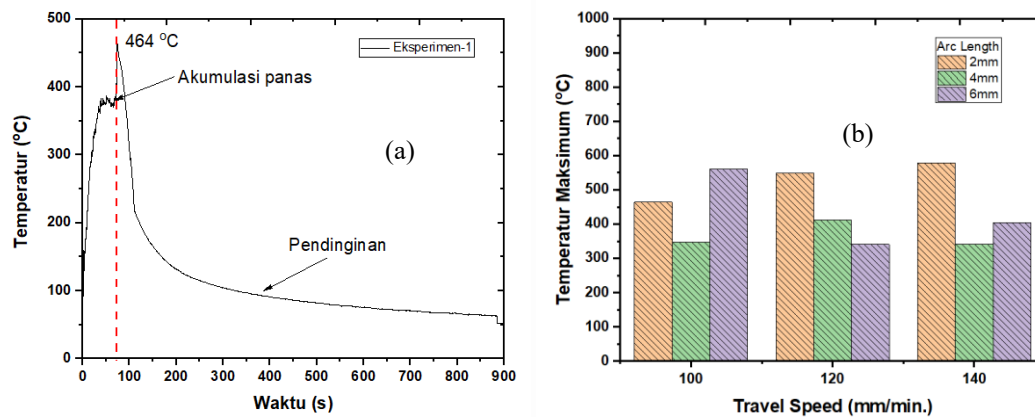
Gambar 2. Proses WAAM GMAW *single-layer*



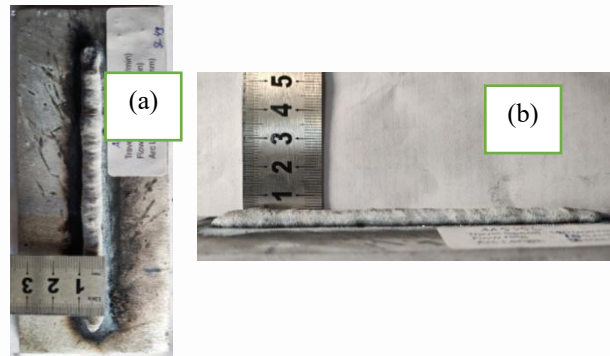
Gambar 3. Hasil proses *single-layer* WAAM GMAW



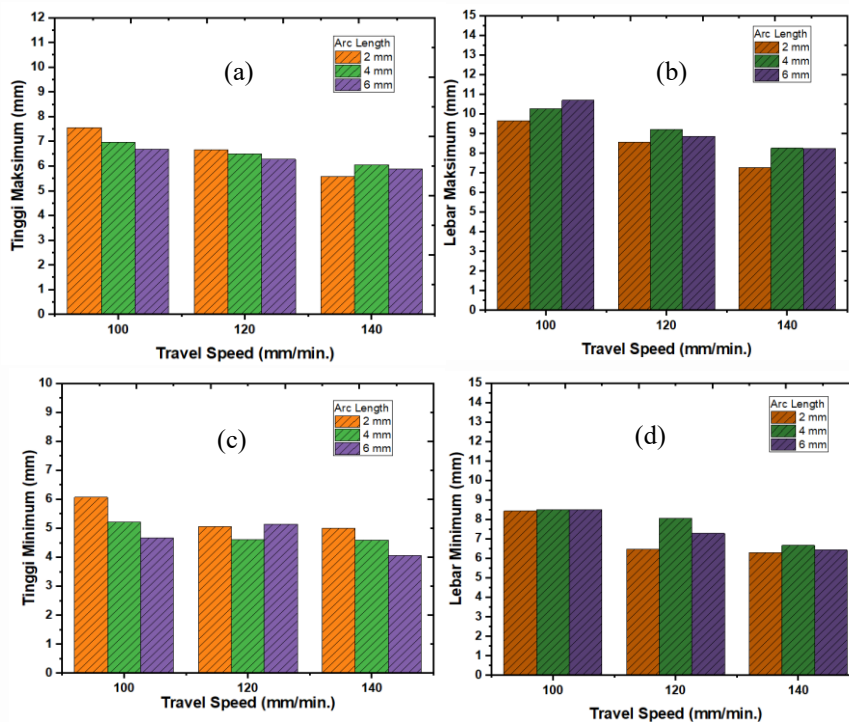
Gambar 4 . Hasil perekaman arus real time (a) sinyal arus (A), dan (b) Arus rata-rata



Gambar 5. Hasil perekaman panas akumulasi (a) Profil temperatur proses WAAM, dan (b) Panas akumulasi



Gambar 6. Pengukuran Geometry, (a) lebar dan (b) tinggi endapan



Gambar 7. Hasil Pengukuran Geometry

Geometry

Hasil proses *single-layer* WAAM GMAW kemudian diukur *geometri* pada tinggi dan lebar endapan. Pengukuran tinggi dan lebar endapan disajikan pada Gambar 6. Pengukuran tinggi dan lebar pada endapan diukur pada area tertentu, terutama tinggi dan lebar minimum dan maksimum.

Hasil pengukuran *geometri*, terutama *tinggi maksimum* dan *lebar maksimum*, dan *tinggi minimum* dan *lebar minimum*, disajikan pada Gambar 7. Tinggi maksimum seperti pada Gambar 7(a) dan 7(c) menunjukkan adanya perbedaan tinggi akibat *travel speed* semakin tinggi; endapan semakin rendah pada *travel speed*. Terdapat pengaruh akibat *arc length*, di mana semakin panjang *arc length*, semakin rendah tinggi maksimumnya. Semakin tinggi *travel speed*, semakin kecil arus rata-rata. Parameter *travel speed*

dan *arc length* berdampak pada *geometry* endapan [23] dan *arc length* berpengaruh pada morfologi endapan [24]. Gambar 7(b) dan 7(d) menunjukkan kondisi lebar minimum dan maksimum yang tidak beraturan.

KESIMPULAN

Hasil eksperimen proses *single-layer* WAAM GMAW dengan menggunakan variasi parameter *travel speed* dan *arc length*, kemudian dilakukan pengukuran panas akumulasi, arus, dan *geometri* endapan, dapat disimpulkan.

1. Proses *single layer* WAAM GMAW dipengaruhi oleh *travel speed*, khususnya pada arus yang terjadi. Semakin tinggi *travel speed*, semakin rendah arus yang terjadi, dan semakin rendah *heat input*.

2. Pada proses eksperimen *single-layer* dengan parameter arus 80 A, tegangan 16 V, dan variasi *travel speed* dan *arc length*, terjadi akumulasi panas secara fluktuatif.
3. Pada geometri endapan *single layer* pada permukaan kampuh dengan *arc length* 6 mm terjadi *humping* sehingga lebar dan tinggi tidak beraturan, dan *travel speed* dan *arc length* memengaruhi tinggi maksimum dan minimum endapan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak terkait, yaitu Departemen Teknik Mesin FT-UI yang telah memberikan dukungan. Penelitian ini didukung oleh pendanaan dari PUTI Q1 tahun 2025 dari Universitas Indonesia dengan nomor kontrak: PKS-230/UN2.RST/HKP.05.00/2025.

KONTRIBUSI PENULIS

Agus Sifa: bertanggung jawab atas konseptualisasi penelitian, analisis data, dan penulisan draf artikel ilmiah. Ario Sunar Baskoro: berperan dalam supervisi selama proses penelitian, mencari pendanaan riset, dan melakukan review dan editing artikel ilmiah. Afrizal Riyantono dan Faza Khoirina: berkontribusi dalam penyusunan konseptualisasi dan metode eksperimen, pengumpulan data, serta analisis data. Gandjar Kiswanto dan Syarif Junaidi: berperan dalam supervisi selama proses penelitian.

DANA PENELITIAN

Sumber pendanaan dari PUTI Q1 tahun 2025 dari Universitas Indonesia, nomor kontrak: PKS-230/UN2.RST/HKP.05.00/2025.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Karayel and Y. Bozkurt, "Additive manufacturing method and different welding applications," 2020, *Elsevier Editora Ltda.* doi: 10.1016/j.jmrt.2020.08.039.
- [2] P. C. Priarone, E. Pagone, F. Martina, A. R. Catalano, and L. Settineri, "Multi-criteria environmental and economic impact assessment of wire arc additive manufacturing," *CIRP Annals*, vol. 69, no. 1, pp. 37–40, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.cirp.2020.04.010.
- [3] F. Montevercchi, G. Venturini, A. Scippa, and G. Campatelli, "Finite Element Modelling of Wire-arc-additive-manufacturing Process," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2016, pp. 109–114. doi: 10.1016/j.procir.2016.08.024.
- [4] Y. Li, C. Su, and J. Zhu, "Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects," Mar. 01, 2022, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.rineng.2021.100330.
- [5] G. Dai *et al.*, "Gradient microstructure and strength-ductility synergy improvement of 2319 aluminum alloys by hybrid additive manufacturing," *J Alloys Compd*, vol. 968, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.jallcom.2023.171781.
- [6] Z. Xu, J. Xiao, and S. Chen, "A novel high-dynamic actuator based in-situ micro-forging process for wire arc additive manufacturing of aluminum alloy," *J Mater Process Technol*, vol. 324, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2023.118259.
- [7] K. E. K. Vimal, M. Naveen Srinivas, and S. Rajak, "Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys: A review," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2019, pp. 1139–1145. doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.153.
- [8] M. Wieczorowski, A. Pereira, D. Carou, B. Gapinski, and I. Ramirez, "Characterization of 5356 Aluminum Walls Produced by Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)," *Materials*, vol. 16, no. 7, Apr. 2023, doi: 10.3390/ma16072570.
- [9] S. K. Sharma, M. Chandra, K. H. Kazmi, A. K. Shukla, and S. Rajak, "Surface Characteristics, Microstructural, and Tribological Behavior of Wire Arc Additive Manufactured Aluminum-5356 Alloy," *J Mater Eng Perform*, 2024, doi: 10.1007/s11665-024-09320-x.
- [10] E. Eimer, S. Williams, J. Ding, S. Ganguly, and B. Chehab, "Mechanical performances of the interface between the substrate and deposited material in aluminium wire Direct Energy Deposition," *Mater Des*, vol. 225, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.matdes.2023.111594.
- [11] Y. M. Elkhoully, W. S. Lim, A. G. Dharmawan, and G. S. Soh, "Adaptive contour based printing of a propeller using hybrid-wire arc additive manufacturing," *Mater Today Proc*, vol. 70, pp. 395–400, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.09.275.
- [12] W. Zhao, S. Tashiro, A. B. Murphy, M. Tanaka, X. Liu, and Y. Wei, "Deepening the understanding of arc characteristics and metal properties in GMAW-based WAAM with wire retraction via a multi-physics model," *J Manuf Process*, vol. 97, pp. 260–274, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.05.008.

- [13] C. Chen, G. Sun, W. Du, J. Liu, and H. Zhang, "Effect of equivalent heat input on WAAM Al-Si alloy," *Int J Mech Sci*, vol. 238, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107831.
- [14] H. K. Lee, J. Kim, C. Pyo, and J. Kim, "Evaluation of bead geometry for aluminum parts fabricated using additive manufacturing-based wire-arc welding," *Processes*, vol. 8, no. 10, pp. 1–14, Oct. 2020, doi: 10.3390/pr8101211.
- [15] W. Li *et al.*, "Processing aluminum alloy with hybrid wire arc additive manufacturing and ultrasonic nanocrystalline surface modification to improve porosity, surface finish, and hardness," *J Manuf Process*, vol. 103, pp. 181–192, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.08.047.
- [16] G. Doumenc *et al.*, "Investigation of residual stresses and modeling of tensile deformation in wire-arc additive manufactured 6061 aluminum alloy: Diffraction and elastoplastic self-consistent model," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 890, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.msea.2023.145891.
- [17] L. Yuan *et al.*, "Investigation of humping phenomenon for the multi-directional robotic wire and arc additive manufacturing," *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 63, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.rcim.2019.101916.
- [18] H. Liu, S. Wang, H. Chen, and J. Xiong, "Drop and hump behaviors in robotic arc-directed energy deposition with vertical position," *Addit Manuf*, vol. 82, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.addma.2024.104049.
- [19] D. Chen, Y. Cai, Y. Luo, X. Wang, L. Chi, and F. Tang, "Measurement and analysis on the thermal and mechanical transfer characteristics of GTA arc affected by arc length," *Measurement*, vol. 153, p. 107431, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107431>.
- [20] N. A. Rosli, M. R. Alkahari, M. F. bin Abdollah, S. Maidin, F. R. Ramli, and S. G. Herawan, "Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process," 2021, *Elsevier Editora Ltda*. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.02.002.
- [21] J. Liu, Y. Xu, Y. Ge, Z. Hou, and S. Chen, "Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments", doi: 10.1007/s00170-020-05966-8/Published.
- [22] M. Gierth, P. Henckell, Y. Ali, J. Scholl, and J. P. Bergmann, "Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of aluminum alloy AlMg5Mn with energy-reduced Gas Metal Arc Welding (GMAW)," *Materials*, vol. 13, no. 12, pp. 1–22, Jun. 2020, doi: 10.3390/ma13122671.
- [23] F. Martina, J. Mehnen, S. W. Williams, P. Colegrove, and F. Wang, "Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V," *J Mater Process Technol*, vol. 212, no. 6, pp. 1377–1386, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.02.002.
- [24] G. Langelandsvik, O. M. Akselsen, T. Furu, and H. J. Roven, "Review of aluminum alloy development for wire arc additive manufacturing," Sep. 01, 2021, *MDPI*. doi: 10.3390/ma14185370.