

**PENGARUH PARAMETER PROSES WIRE ARC ADDITIVE
MANUFACTURING (WAAM) TERHADAP GEOMETRI BUTIR LAS
TUNGGAL ER5356**

**EFFECT OF WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING (WAAM) PROCESS
PARAMETERS ON THE GEOMETRY OF SINGLE ER5356 WELD BEADS**

**Deni Andriyansyah¹⁾, Herianto²⁾, Emanuel Budi Raharjo³⁾, Husein Arif Susanto⁴⁾,
Gervasius Andro Hermawan Mintardjo⁵⁾**

^{1,4,5}Prodi D3 Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Warga Surakarta, Sukoharjo, Indonesia.

²Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, Sleman, Indonesia.

³Prodi D3 Teknik Elektronika, Sekolah Tinggi Teknologi Warga Surakarta, Sukoharjo, Indonesia.

email: deni.andriyansyah@sttw.ac.id¹⁾*, herianto@ugm.ac.id²⁾, bimower1980@sttw.ac.id³⁾,
ha.susanto@sttw.ac.id⁴⁾, g.andro@sttw.ac.id⁵⁾

Abstrak

Penelitian ini menginvestigasi pengaruh parameter cetak WAAM pada geometri butir las tunggal dengan elektroda aluminium ER5356 berdiameter 1,0 mm. Parameter yang divariasikan pada penelitian ini antara lain Tegangan, Arus dan *Feedrate* masing-masing sebesar 18 V, 22 V, 26 V; 100 A, 140 A, 180 A; 500 mm/menit, 750 mm/menit dan 1000 mm/menit. Proses pencetakan spesimen menghasilkan butir las *discontinuous* dan *continuous*. Spesimen *continuous* dengan geometri butir las yang konsisten mempunyai *Heat Input* (HI) pada rentang 0,17 kJ/min hingga 0,43 kJ/min. HI pengelasan menghasilkan pengaruh positif ketika tegangan yang digunakan relatif rendah (18 V) dan arus tinggi (180 A). Peningkatan tegangan tidak berpengaruh secara signifikan pada pembentukan butir las yang konsisten. Pengaturan arus tinggi dan tegangan rendah menghasilkan butir las yang lebih konsisten bila dibandingkan dengan kombinasi arus tinggi dan tegangan tinggi. Sementara itu, *feedrate* berkontribusi pada pembentukan geometri butir las. Semakin tinggi *feedrate*, lebar dan tinggi butir las cenderung mengalami penurunan. Lebar dan tinggi *layer* minimum yang dihasilkan dari proses pencetakan adalah 6,723/1,364 mm melalui pengaturan parameter 22 V, 140 A, dan 1000 mm/min. Sedangkan lebar dan tinggi *layer* terbesar dihasilkan oleh pengaturan parameter 26 V, 180A, dan 500 mm/min dengan nilai lebar dan tinggi *layer* 14,293/2,8 mm.

Kata Kunci: parameter, WAAM, geometri, butir las, ER5356.

Abstract

This study examined the effects of WAAM printing parameters on single weld bead geometry using ER5356 aluminum electrode (0.1 mm diameter). Parameters varied include Voltage (18 V, 22 V, 26 V), Current (100 A, 140 A, 180 A), and Feedrate (500 mm/min, 750 mm/min, 1000 mm/min). The process produced both discontinuous and continuous weld beads. Continuous weld beads with Heat Input (HI) ranging from 0.17 kJ/mm to 0.43 kJ/mm were achieved under low voltage (18 V) and high current (180 A) settings. Voltage variation did not significantly affect bead consistency, but consistent welds were

Received:
23 Agustus
2024

Accepted:
4 Desember
2024

Published:
31 Desember
2024



more prevalent under high-current and low-voltage conditions than with high-voltage settings. Feedrate influenced bead geometry, with lower feedrates producing larger weld grains. The smallest layer width (6.77 mm) and height (1.36 mm) were obtained with 22 V, 140 A, and 1000 mm/min, while the largest width (14.29 mm) and height (2.8 mm) resulted from 26 V, 180 A, and 500 mm/min. This study highlights the impact of voltage, current, and feedrate on weld bead geometry and consistency in WAAM processes.

Keywords: parameter, WAAM, geometry, weld bead, ER5356.

DOI:10.20527/sjmeKinematika.v9i2.363

How to cite: Andriyansyah, D., Herianto, Raharjo, E. B., Susanto, H. A., Mintardjo, G. A. H., "Pengaruh Parameter Proses Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Terhadap Geometri Butir Las Tunggal ER5356". *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 9(2), 254-263, 2024.

PENDAHULUAN

Teknologi 3D *printing* menjadi salah satu metode manufaktur yang cukup potensial. Teknologi ini memiliki kelebihan dalam mengurangi material sisa dan konsumsi energi pada proses produksi sebuah objek[1]. Teknologi 3D *printing* yang cukup populer di Indonesia diantaranya adalah *Fused Deposition Modeling* (FDM) menggunakan material polimer. FDM banyak digunakan untuk proses *Rapid Prototyping*, yaitu pembuatan *prototype* objek secara cepat. Teknologi ini kemudian berkembang tidak terbatas pada pembuatan *prototype* objek, namun sudah digunakan dalam pembuatan objek fungsional. Sifat mekanis objek menjadi fokus utama pada pembuatan objek-objek fungsional sedangkan material polimer mempunyai keterbatasan tertentu untuk aplikasi ini.

Proses penyambungan material logam umumnya dilakukan melalui proses pengelasan baik dengan metode *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW)[2], *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) maupun *Ultrasonic Welding*[3]. GMAW atau juga dikenal dengan *Metal Inert Gas* (MIG) merupakan salah satu metode pengelasan yang mempunyai prinsip kerja mirip dengan FDM. Proses penyambungan objek dilakukan dengan melelehkan elektroda/ kawat las pada nozel sehingga objek penyambungan turut meleleh dalam sambungan. Pengelasan MIG memerlukan *shielding gas* berupa gas CO₂ atau Argon. Material yang dapat digunakan pada metode pengelasan ini bervariasi dari logam, *stainless*, kuningan, maupun aluminium. Dengan mengatur jalur pengelasannya, maka teknologi pengelasan MIG dapat digunakan sebagai metal 3D *printing* berbasis pengelasan atau *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM)[4].

WAAM dapat digunakan untuk membuat objek logam dengan ikatan antar *layer* yang kuat[5]. Teknologi 3D *printing* menghasilkan *ladder effect* dimana semakin besar tinggi *layer*, maka kekasaran permukaan akan semakin meningkat[6]. *Ladder effect* juga berkontribusi terhadap akurasi dimensi objek. Pada proses pembuatan objek berbasis WAAM, ketinggian *layer* pada umumnya berkisar antara 0,8-1,2 mm[7]. Ketinggian *layer* ini cukup besar bila dibandingkan dengan teknik FDM polimer dimana ketinggian *layer* berkisar 0,1-0,3 mm. Hal ini menyebabkan kualitas permukaan objek hasil WAAM memiliki kekasaran yang tinggi. Maka dari itu, studi parameter proses WAAM banyak dilakukan untuk mendapatkan kualitas objek yang optimal, mendekati kualitas objek hasil pemesinan konvensional. Walaupun kualitas objek hasil WAAM masih lebih rendah, teknologi WAAM mempunyai rasio penggunaan material yang kecil sehingga menghasilkan lebih sedikit material sisa dibandingkan dengan proses pemesinan konvensional[8].

Penelitian mengenai WAAM sudah banyak dilakukan, diantaranya oleh Wanwan dkk[9] yang menyatakan bahwa karakter makroskopis dan struktur mikro WAAM dengan material *stainless steel* dipengaruhi oleh kecepatan kawat las, arus pengelasan, waktu pendinginan dan temperatur *interlayer*. Studi eksperimental dan simulasi terhadap bentuk geometri butir las dilakukan oleh Ding dkk[8]. *Tangent overlapping model* (TOM)

digunakan untuk memprediksikan *overlapping* antar *layer*, sehingga geometri objek lebih akurat dan lebih efisien dalam deposisi materialnya. Abe dkk[5] meneliti pengaruh parameter proses terhadap akurasi objek hasil WAAM berupa kisi-kisi balok. Penelitian ini menyimpulkan bahwa *Heat Input* mempengaruhi bentuk geometri kisi-kisi. Waktu pengelasan mempengaruhi ketinggian *layer* dan diameter kisi. Investigasi menggunakan *CT scan* menunjukkan bahwa ukuran objek menjadi lebih kecil $\pm 2,3$ mm dari objek asli. Xiong dkk[7] menggunakan WAAM berbasis GMAW untuk meneliti pengaruh parameter proses terhadap kualitas permukaan objek. Peningkatan temperatur *interlayer* berpengaruh terhadap peningkatan kekasaran permukaan dan penurunan ketinggian *layer*. Peningkatan kecepatan deposisi menyebabkan penurunan *ladder effect* sehingga menurunkan ketinggian *layer*. Peningkatan kecepatan deposisi diatas 420 mm/menit menyebabkan kualitas permukaan objek menjadi rendah karena busur las menjadi tidak stabil dan meningkatkan percikan *spatter*. Sementara itu Bai dkk[10] menginvestigasi struktur mikro dan sifat mekanis dari material kawat Al 2219 menggunakan metode TIG. Penelitian ini menyimpulkan objek yang dihasilkan memiliki kekerasan rata-rata 77,5 HV0.2 serta kekuatan tarik rata-rata 237 MPa (57% dari nilai standar). Objek hasil WAAM memerlukan penguatan pasca cetak untuk mendapatkan sifat mekanis mendekati standar. Penelitian menggunakan *Low-Cost 3D Printer* juga sudah dilakukan oleh Rosli dkk[11] yang menginvestigasi akurasi dimensi objek dengan material besi. Metode las yang digunakan adalah GMAW dengan hasil penyimpangan akurasi objek sebesar 1%.



Gambar 1. Mesin yang digunakan pada WAAM; a. Robot 5 Aksis, b. *Complex CNC Machine*[12].

Pada umumnya, mesin yang digunakan dalam penelitian WAAM adalah modifikasi robot 5 aksis atau *complex CNC machine*[12] seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Mesin-mesin ini membutuhkan investasi yang cukup mahal dalam pengadaannya, sehingga aksesnya cukup terbatas. Peneliti lain menggunakan modifikasi mesin *3D Printer Desktop* yang lebih murah sebagai WAAM dipadukan dengan mesin las seperti GMAW[11]. Dalam proses *Additive Manufacturing* (AM), pengaturan tinggi dan lebar *layer* sangat penting untuk menghasilkan objek dengan bentuk dan kualitas yang sesuai. Penelitian WAAM mengenai geometri *layer* dengan berbagai material sudah banyak dilakukan, namun penelitian WAAM menggunakan material aluminium seri ER5356 masih jarang dilakukan. Maka dari itu penelitian ini menginvestigasi pengaruh parameter cetak pada geometri butir las menggunakan elektroda ER5356 dengan diameter 1,0 mm.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan mesin 3D *Printer Desktop* yang dimodifikasi pada bagian ekstrudernya menjadi pemegang stang las MIG. Set Up alat dan bahan dapat dilihat pada Gambar 2. Mesin 3D *Printer* bergerak dalam tiga sumbu aksis dengan area kerja masing-masing untuk sumbu x, y dan z berturut-turut 200, 400 dan 100 mm. *Software Repetier-Host* digunakan dalam pembuatan *G-Code* untuk mengendalikan gerakan mesin 3D *Printer* baik secara *online* maupun *offline*. Material elektroda yang digunakan adalah ER5356 dengan diameter 1 mm, serta aluminium seri 5 sebagai *base plate*. Mesin las MIG yang digunakan adalah mesin las merek OTC dengan spesifikasi *Input Voltage* 380 V, *Output Voltage* 16,5-31,5 V dan *Output Current* 50-350 A.



Gambar 2. *Set up* Alat dan Bahan Penelitian

Parameter pencetakan yang digunakan dalam penelitian ini adalah tegangan, arus, dan *feedrate* mesin dengan masing-masing tiga variasi. Variasi parameter pencetakan ditunjukkan pada Tabel 1. Metode pengambilan data menggunakan metode *full factorial* sehingga dihasilkan 27 spesimen uji berupa butir las tunggal. Proses pencetakan butir las tunggal dilakukan sepanjang 100 mm untuk mengetahui karakter fisis berupa lebar dan tebal butir las. Lebar dan tinggi butir las diukur menggunakan *software ImageJ* sementara pengambilan gambar dilakukan dari atas dan samping spesimen menggunakan kamera DSLR.

Tabel 1. Variasi parameter pencetakan

Parameter	Nilai		
Tegangan (V)	18	22	26
Arus (A)	100	140	180
Feedrate Mesin (mm/menit)	500	750	1000

Pembahasan hasil penelitian melibatkan perhitungan *Heat Input* (HI). HI merupakan faktor yang digunakan untuk mengukur pengaruh pemanasan pada proses pengelasan. HI juga dikenal dengan nama difusifitas termal yang mempengaruhi pembentukan mikrostruktur dan bentuk geometri hasil pengelasan karena variasi termal[13]. HI dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Q = \frac{V * I * 60}{S * 1000} \times Efficiency \quad (1)$$




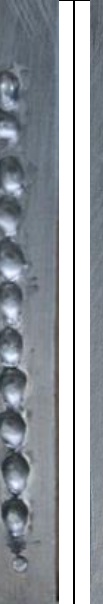
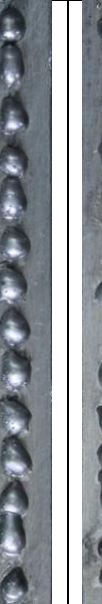




Dimana Q=*Heat Input* (KJ/min), V= Tegangan Pengelasan (V), I= Arus Pengelasan (A), S= Kecepatan Kawat Las (mm/min) sedangkan Efisiensi untuk metode pengelasan MIG adalah 0,9.

Parameter terbaik dalam penelitian ini ditentukan berdasarkan hasil pengamatan dan pengukuran geometri butir las. Fokus penelitian ini adalah parameter WAAM yang menghasilkan butir las dengan karakter *continuous* serta lebar dan tebal yang paling kecil.

HASIL DAN PEMBAHASAN












Proses pencetakan menghasilkan 27 spesimen dengan variasi parameter dan hasil cetak butir las tunggal yang ditampilkan pada Tabel 2. Butir las yang terbentuk dari proses pencetakan terdiri dari butir las *discontinuous* dan *continuous*. Butir las *discontinuous* ditandai oleh bentuk butir las yang putus-putus dan tidak rata baik dari segi lebar maupun tingginya, sedangkan butir las *continuous* ditandai dengan bentuk butir las yang seragam[14]. Spesimen butir las *discontinuous* secara jelas dapat diamati pada spesimen A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2, serta C3. Spesimen selanjutnya memiliki karakter *continuous* namun mempunyai lebar dan tebal butir las yang tidak konsisten dengan permukaan yang cenderung kasar. Spesimen tersebut adalah A4, A5, A6, C4, C5, C6, C7, C8 serta C9. Sementara spesimen A7, A8, A9, B4, B5, B6, B7, B8, dan B9 termasuk pada kategori butir las *continuous* dengan lebar dan tebal butir las yang konsisten dengan permukaan cenderung lebih halus. Hasil visual keseluruhan spesimen dapat dilihat pada lampiran.

Tabel 2. Pengaruh Tegangan Terhadap Karakter Butir Las

Spesimen (V, A, F)	A1 (18, 100, 500)	B1 (22, 100, 500)	C1 (26, 100, 500)	A2 (18, 100, 750)	B2 (22, 100, 750)	C2 (26, 100, 750)	A3 (18, 100, 1000)	B3 (22, 100, 1000)	C3 (26, 100, 1000)
Hasil Pencetak- an									




Pengaruh variasi tegangan terhadap karakter butir las spesimen dapat dilihat pada Tabel 2. Tegangan yang digunakan pada spesimen A1, B1, dan C1 berturut-turut adalah 18 V, 22 V, dan 26 V dengan arus dan *feedrate* tetap. Karakter butir las yang terbentuk masih cenderung *discontinuous* dan tidak ada perbedaan yang signifikan antara spesimen A1, B1, dan C1. Hal yang sama dapat ditemukan pada kelompok spesimen A2, B2, dan C2, serta A3, B3, dan C3. Namun, peningkatan tegangan mengindikasikan perubahan bentuk butir las yang cenderung lebih rapi. Peningkatan tegangan pengelasan pada umumnya dapat meningkatkan ukuran kolom las, sehingga pengaturan tegangan yang tepat akan meningkatkan kualitas dan kekuatan fatig hasil pengelasan[15].

Tabel 3. Pengaruh Arus Terhadap Karakter Butir Las

Spesimen (V, A, F)	A1 (18, 100, 500)	A4 (18, 140, 500)	A7 (18, 180, 500)	B1 (22, 100, 500)	B4 (22, 140, 500)	B7 (22, 180, 500)	C1 (26, 100, 500)	C4 (26, 140, 500)	C7 (26, 180, 500)	C8 (26, 180, 750)	C9 (26, 180, 1000)
Hasil Pencetakan											

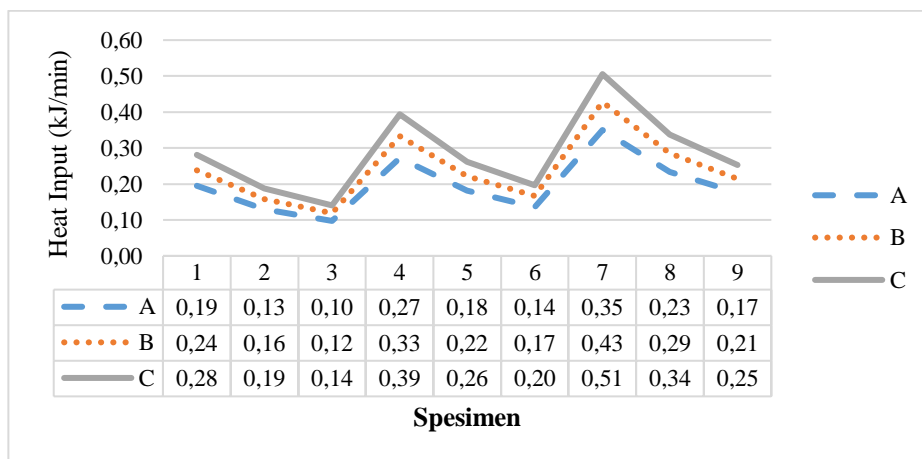
Pengaruh variasi arus pada proses pencetakan spesimen terlihat jelas pada spesimen A1, A4, dan A7 yang ditunjukkan pada Tabel 3. Arus yang digunakan pada kelompok spesimen ini berturut-turut adalah 100 A, 140 A, dan 180 A dengan tegangan dan *feedrate* tetap. Hal yang sama dapat diamati pada setiap kelompok spesimen dengan arus yang divariasikan sementara tegangan dan *feedrate* dijaga tetap. Misalnya pada kelompok spesimen B1, B4, dan B7 atau C1, C4, dan C7, kualitas butir las berubah dari *discontinuous* menjadi *continuous*. Arus yang semakin tinggi berkontribusi dalam proses pelelehan elektroda yang lebih baik[16]. Spesimen C7, C8, dan C9 sebenarnya memiliki karakter butir las *continuous*. Namun karena proses pencetakan yang dilakukan menggunakan kombinasi tegangan dan arus yang paling tinggi, hasil pengelasan butir las menjadi cacat karena *burn-through*. Hal ini dapat dilihat pada bentuk butir las yang terlalu cair dan proses pengelasan menembus sisi bawah spesimen.

Tabel 4. Pengaruh Kecepatan Terhadap Karakter Butir Las

Spesimen (V, A, F)	B4 (22, 140, 500)	B5 (22, 140, 750)	B6 (22, 140, 1000)
Hasil Pencetakan			

Sementara itu pengaruh kecepatan terhadap kualitas butir las dapat dilihat pada Tabel 4. Kelompok spesimen B4, B5, serta B6 menunjukkan hasil *trade-off* antara tegangan dan arus dengan kecepatan pengelasan. Pada kecepatan 500 mm/menit, kualitas butir las cukup konsisten, namun ketika kecepatan pengelasan ditingkatkan pada nilai 750 mm/menit dan 1000 mm/menit, kualitas butir las cenderung lebih kasar (bergelombang). Pada proses pencetakan dengan tegangan dan arus yang kecil, kualitas butir las dapat ditingkatkan dengan memperlambat kecepatan pengelasan pada nilai yang tepat[16]. *Feedrate* mengatur jumlah material *filler* yang terdeposisi, hal ini berpengaruh langsung terhadap geometri dan penetrasi butir las[17].

Analisis Heat Input



Gambar 3. Heat Input masing-masing Spesimen

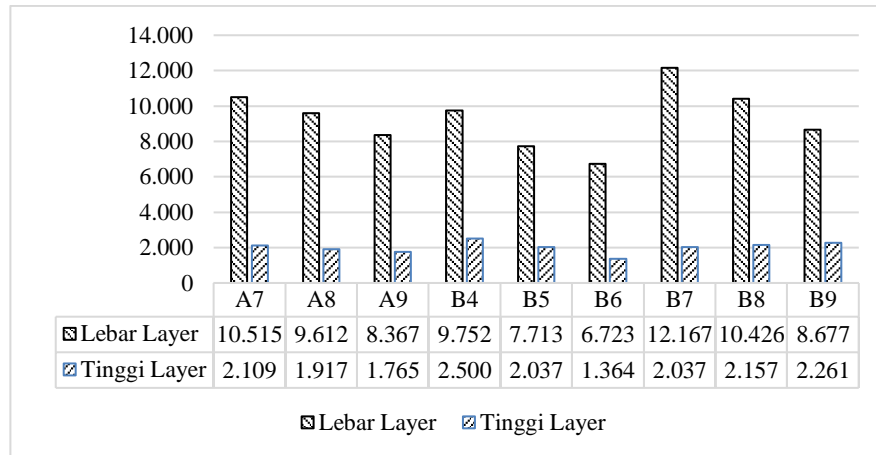
Berdasarkan Gambar 3, HI proses pencetakan spesimen minimum adalah 0,1 kJ/min dan maksimum 0,43 kJ/min. Butir las *continuous* dihasilkan pada nilai HI berkisar antara 0,17-0,43 kJ/min. Beberapa spesimen dengan karakter butir las *discontinuous* memiliki nilai HI yang berada pada rentang spesimen *continuous*. Spesimen ini memiliki nilai HI minimum 0,1 kJ/min pada spesimen A3 sedangkan HI maksimum bernilai 0,28 kJ/min pada spesimen C1. Walaupun nilai HI spesimen *discontinuous* berada pada rentang spesimen *continuous*, pengaturan tegangan yang kecil (18 V) menyebabkan butir las yang terbentuk menjadi *discontinuous*.

HI untuk spesimen *continuous* dengan profil butir las yang tidak rata berkisar antara 0,20 kJ/min pada spesimen C6 dan 0,51 kJ/min pada spesimen C7. Tegangan yang tinggi (180 V) berperan dalam peningkatan panjang busur las yang terbentuk pada saat proses pengelasan. Semakin besar nilai busur las, maka panas yang terbentuk lebih mudah tersebar[18]. Hal ini dipadukan dengan arus yang tinggi, sehingga butir las terlalu cair pada saat proses pengelasan dan tidak dapat mempertahankan bentuk butir las yang ideal. Sementara itu spesimen *continuous* dengan butir las yang konsisten mempunyai HI pada rentang 0,17 kJ/min hingga 0,43 kJ/min. Spesimen ini menggunakan tegangan yang lebih rendah yaitu 18 V dan 22 V. HI pengelasan menghasilkan pengaruh positif ketika tegangan yang digunakan relatif rendah (18 V) dan arus tinggi (180 A).

Geometri Butir Las

Proses pencetakan objek pada 3D *printing* membutuhkan *layer* yang *continuous* sehingga proses pengukuran lebar dan tinggi butir las hanya dilakukan pada spesimen yang

memenuhi syarat, yaitu butir las *continuous*. Gambar 4 menunjukkan variasi lebar dan tinggi *layer* untuk masing-masing spesimen butir las *continuous*. Spesimen C7, C8, dan C9 sebenarnya termasuk pada kategori *continuous*. Namun ketiga spesimen tersebut mengindikasikan adanya *burn through* yang ditandai dengan bentuk butir las yang terlalu cair sehingga tidak dimasukkan dalam pembahasan geometri butir las.



Gambar 4. Lebar dan Tinggi *Layer* Spesimen *Continuous*

Berdasarkan Gambar 4, pengaruh tegangan terhadap lebar dan tinggi butir las ditunjukkan oleh spesimen A7 dan B7. Peningkatan tegangan berkontribusi pada peningkatan lebar dan penurunan tinggi butir las dari (lebar/tinggi) 10,515/2,109 mm menjadi 12,167/2,037 mm. Pengaruh yang sama dihasilkan oleh variasi arus, yang dapat dilihat pada spesimen B4 dan B7 dimana terjadi perubahan lebar dan tinggi butir las dari 9,752/2,5 mm menjadi 12,167/2,037 mm. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi tegangan yang digunakan, maka panjang busur las semakin tinggi dan membuat butir las lebih menyebar. Peningkatan arus menyebabkan HI menjadi lebih tinggi sehingga mempermudah pelelehan elektroda. Sementara itu, kecepatan pengelasan mempengaruhi ukuran lebar dan tinggi butir las/*layer*[19,20]. Hal ini ditandai oleh tren grafik pada Gambar 4 untuk kelompok spesimen A7, A8, A9, cenderung menurun, begitu juga dengan kelompok spesimen B4, B5, dan B6 maupun B7, B8, serta B9. Nilai lebar dan tinggi butir las rata-rata untuk butir las *continuous* berturut-turut adalah 9,828 mm dan 2,106 mm.

Lebar *layer* pada proses 3D Printing FDM polimer biasanya berkisar antara 0,4-0,6 mm dengan ketinggian bervariasi dari 0,1-0,6 mm. Semakin kecil lebar dan tinggi *layer*, maka objek yang dihasilkan semakin detail dan presisi. Pada WAAM, *layer* yang terbentuk pada umumnya lebih besar dari FDM polimer, yaitu berkisar 7-9 untuk lebar *layer* serta 1-4 mm[21]. Pada penelitian ini, lebar dan tinggi *layer* minimum yang dihasilkan dari proses pencetakan adalah 6,723/1,364 mm melalui pengaturan parameter 22 V, 140 A, dan 1000 mm/min. Sedangkan lebar dan tinggi *layer* terbesar dihasilkan oleh pengaturan parameter 26 V, 180A, dan 500 mm/min dengan nilai lebar dan tinggi *layer* 14,293/2,8 mm.

KESIMPULAN

Proses pencetakan spesimen dengan karakter butir las *continuous* sangat ditentukan oleh besar arus yang digunakan. Pengaturan tegangan tidak berpengaruh secara signifikan pada pembentukan butir las yang konsisten. Pengaturan arus tinggi dan tegangan rendah menghasilkan butir las yang lebih konsisten bila dibandingkan dengan kombinasi arus tinggi dan tegangan tinggi. Kombinasi arus dan tegangan yang tinggi mengindikasikan terjadinya *burn through* sehingga tidak direkomendasikan untuk pencetakan spesimen WAAM dengan

material elektroda ER5356. Sementara itu, *feedrate* berkontribusi pada pembentukan geometri butir las. Semakin tinggi *feedrate*, lebar dan tinggi butir las cenderung mengalami penurunan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Jendral Pendidikan Vokasi Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi Indonesia atas dukungan dana yang diberikan. (Nomor Kontrak Induk:198/SPK/D.D4/PPK.01.APTV/VI/2023).


















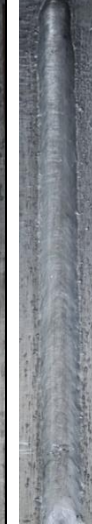
REFERENSI

- [1] R. Huang *et al.*, “Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components,” *J. Clean. Prod.*, vol. 135, pp. 1559–1570, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.04.109.
- [2] J. Aldo and R. S. Rahmany, “Analisis Pengaruh Temperatur Media Pendingin Proses Pengelasan Smaw Terhadap Nilai Kekerasan Dan Pada Baja Karbon Sedang,” *Sci. J. Mech. Eng. Kinemat.*, vol. 7, no. 2, pp. 73–82, 2022, doi: 10.20527/sjmekinematika.v7i2.226.
- [3] D. Mulyadi, B. Sofiyanti, A. Adhi Nugroho, P. Studi Teknik Mesin, and U. Buana Perjuangan Karawang, “Optimasi Parameter Mesin Ultrasonic Welding Untuk Penyambungan Material Termoplastik,” *Sci. J. Mech. Eng. Kinemat.*, vol. 9, no. 1, pp. 55–65, 2024, doi: 10.20527/sjmekinematika.v9i1.296.
- [4] J. B. Bento, A. Lopez, I. Pires, L. Quintino, and T. G. Santos, “Non-destructive testing for wire + arc additive manufacturing of aluminium parts,” *Addit. Manuf.*, vol. 29, no. July, p. 100782, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.100782.
- [5] T. Abe and H. Sasahara, “Layer geometry control for the fabrication of lattice structures by wire and arc additive manufacturing,” *Addit. Manuf.*, vol. 28, no. January, pp. 639–648, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.06.010.
- [6] A. E. Tontowi, *Laser Sintering: Teori, Simulasi Numerik dan Eksperimen*, 1st ed. Yogyakarta: UGM PRESS, 2018. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=L65TDwAAQBAJ&lpg=PA1&ots=1nlwaOMUfN&lr&pg=PA1#v=onepage&q&f=false>
- [7] J. Xiong, Y. Li, R. Li, and Z. Yin, “Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 252, pp. 128–136, 2018, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.09.020.
- [8] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, “A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM),” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 31, pp. 101–110, 2015, doi: 10.1016/j.rcim.2014.08.008.
- [9] J. Wanwan, Z. Chaoqun, J. Shuoya, T. Yingtao, W. Daniel, and L. Wen, “Wire Arc Additive Manufacturing of Stainless Steels: A Review,” *Appl. Sci.*, vol. 10, p. 1563, 2020.
- [10] J. Y. Bai, C. L. Yang, S. B. Lin, B. L. Dong, and C. L. Fan, “Mechanical properties of 2219-Al components produced by additive manufacturing with TIG,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 86, no. 1–4, pp. 479–485, 2016, doi: 10.1007/s00170-015-8168-x.
- [11] N. Ana Rosli, M. Rizal Alkahari, F. Redza Ramli, S. Mat, A. Anas Yusof, and F. Kejuruteraan Mekanikal, “Influence of process parameters on dimensional accuracy in GMAW based additive manufacturing,” no. August, pp. 7–9, 2019, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/342671975>

- [12] F. Martina, “Investigation of methods to manipulate geometry, microstructure and mechanical properties in titanium large scale Wire+Arc Additive Manufacturing,” *Cranf. Univ.*, 2014, [Online]. Available: <http://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/9270>
- [13] W. Tayier, S. Janasekaran, and V. P. Vijayasree, “Evaluation of heat input and bead geometry of zincalume steel (G550) welded joint between metal inert gas (MIG) and laser beam welding (LBW),” *Mater. Today Proc.*, vol. 48, pp. 895–904, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.494.
- [14] N. W. Dreveck, L. D. Barbetta, D. Bond, and G. O. Verran, “Influence of push and pull techniques on high-speed buried-arc gma process,” *Soldag. e Insp.*, vol. 25, no. September, pp. 1–11, 2020, doi: 10.1590/0104-9224/SI25.23.
- [15] X. Lv, X. Sun, K. Qi, and C. Shi, “Establishment of a geometric model for weld beads based on welding parameters,” in *Proc.SPIE*, Apr. 2024, p. 1308224. doi: 10.1117/12.3026869.
- [16] S. Khrais, H. Al Hmoud, A. Abdel Al, and T. Darabseh, “Impact of Gas Metal Arc Welding Parameters on Bead Geometry and Material Distortion of AISI 316L,” *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 7, no. 4, 2023, doi: 10.3390/jmmp7040123.
- [17] K. A. G and R. R. V, “Investigation on effects of parameters of GMAW process on bead geometry, hardness and microstructure of AISI 410 steel weldments,” *Adv. Mater. Process. Technol.*, vol. 8, no. 3, pp. 2450–2464, 2022, doi: 10.1080/2374068X.2021.1912537.
- [18] V. Pratap Singh, K. Dahiya, and P. Khanna, “Mathematical analysis of effect of process parameters on weld bead geometry of MIG welded low carbon steel plates,” *Mater. Today Proc.*, vol. 56, pp. 655–660, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.01.022.
- [19] H. Liao *et al.*, “Effects of welding speed on welding process stability, microstructure and mechanical performance of SUS304 welded by local dry underwater pulsed MIG,” *J. Manuf. Process.*, vol. 88, no. September 2022, pp. 84–96, 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.01.047.
- [20] X. Wu, X. Zhao, J. Chen, Z. Zhang, and C. Wu, “Simulation of the influence of welding parameters on weld pool behavior during a TIG-MIG hybrid welding process,” *J. Manuf. Process.*, vol. 79, no. May, pp. 460–475, 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.05.007.
- [21] Z. Yin and J. Xiong, “Stereovision measurement of layer geometry in wire and arc additive manufacturing with various stereo matching algorithms,” *J. Manuf. Process.*, vol. 56, no. April, pp. 428–438, 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.05.001.

Lampiran

Tabel Variasi parameter dan hasil cetak spesimen

Spesimen (V, A, F)	A1 (18, 100, 500)	A2 (18, 100, 750)	A3 (18, 100, 1000)	A4 (18, 140, 500)	A5 (18, 140, 750)	A6 (18, 140, 1000)	A7 (18, 180, 500)	A8 (18, 180, 750)	A9 (18, 180, 1000)
Hasil Pencetakan									
Spesimen (V, A, F)	B1 (22, 100, 500)	B2 (22, 100, 750)	B3 (22, 100, 1000)	B4 (22, 140, 500)	B5 (22, 140, 750)	B6 (22, 140, 1000)	B7 (22, 180, 500)	B8 (22, 180, 750)	B9 (22, 180, 1000)
Hasil Pencetakan									

Spesimen (V, A, F)	C1 (26, 100, 500)	C2 (26, 100, 750)	C3 (26, 100, 1000)	C4 (26, 140, 500)	C5 (26, 140, 750)	C6 (26, 140, 1000)	C7 (26, 180, 500)	C8 (26, 180, 750)	C9 (26, 180, 1000)
Hasil Pencetakan	