

**Analisis Geometri dan Metalografi Logam Deposit Hasil  
Proses WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*)  
menggunakan GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) dengan  
Kawat Las ER4043**

*Geometry and Metallographic Analysis of Deposit Metal from WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) Process using GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) with ER4043 Welding Wire*

**SKRIPSI**

**Oleh:**

**Nama: Muhammad Whisnu Nugraha**

**NPM: 173030048**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS PASUNDAN  
BANDUNG  
2024**

# LEMBAR PENGESAHAN

## **Analisis Geometri dan Metalografi Logam Deposit Hasil Proses WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*) menggunakan GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) dengan Kawat Las ER4043**

*Geometry and Metallographic Analysis of Deposit Metal from WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) Process using GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) with ER4043 Welding Wire*



**Nama: Muhammad Whisnu Nugraha**  
**NPM: 173030048**

Pembimbing Utama

Dr.Ir. Dedi Lazuardi, DEA.

Pembimbing Pendamping

Ir. Agus Sentana, M.T.

## ABSTRAK

*Wire Addictive Arc Manufacturing* (WAAM) adalah proses manufaktur yang memanfaatkan peleburan logam dengan deposisi energi langsung menggunakan kawat las dan busur listrik sebagai sumber energi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis deposit logam yang dihasilkan dari proses WAAM dengan metode *Tungsten Inert Gas* (TIG) pada material AA6061 dengan menggunakan logam pengisi ER4043. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan penggunaan logam pengisi ER4043 pada proses WAAM dengan material AA6061. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan mesin WAAM yang dilengkapi dengan sistem TIG. Material AA6061 digunakan sebagai bahan dasar, sedangkan logam pengisi ER4043 digunakan untuk menghasilkan deposit logam. Uji geometri dan uji metalografi dilakukan untuk mengevaluasi kualitas deposit logam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan logam pengisi ER4043 pada proses WAAM dengan material AA6061 menghasilkan deposit logam dengan kualitas yang baik. Uji geometri menunjukkan bahwa bentuk deposit logam sesuai dengan yang diharapkan. Banyak ditemukan porositas pada pengujian mikro yang disebabkan oleh ketidak konsistenan kecepatan pengelasan dan jarak antara sumbu las dan *base metal* saat pengelasan berlangsung dikarenakan proses pengelasan manual yang tidak memungkinkan terjadinya porositas dari hasil pengelasan. Dari kesimpulan yang dihasilkan dari penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa proses WAAM dengan menggunakan kawat las ER4041 pada AA6061 menunjukkan bahwa arus sangat memengaruhi, di mana arus 120A lebih banyak terdapat cacat porositas dibandingkan dengan arus 100A dan 110A.

**Kata kunci:** Metode WAAM, ER4043, AA6061, Pengujian Metalografi, Pengujian Geometri.

## ABSTRACT

*Wire Addictive Arc Manufacturing (WAAM) is a manufacturing process that utilizes metal melting with direct energy deposition using welding wire and electric arc as the energy source. This research aims to analyze the metal deposit produced from the WAAM process by Tungsten Inert Gas (TIG) method on AA6061 material using ER4043 filler metal. This study aims to evaluate the feasibility of using ER4043 filler metal in the WAAM process with AA6061 material. This research was conducted using a WAAM machine equipped with a TIG system. AA6061 material was used as the base material, while ER4043 filler metal was used to produce the metal deposit. Geometry tests and metallographic tests were conducted to evaluate the quality of the metal deposit. The results show that the use of ER4043 filler metal in the WAAM process with AA6061 material produces metal deposits with good quality. The geometry test shows that the shape of the metal deposit is as expected. Many porosities were found in the micro test caused by inconsistencies in welding speed and the distance between the weld axis and base metal during welding due to the manual welding process which does not allow porosity from the welding results. From the conclusions generated from this research, it can be concluded that the WAAM process using ER4041 welding wire on AA6061 shows that the current is very influential, where the 120A current has more porosity defects compared to the 100A and 110A currents.*

**Keywords:** WAAM Method, ER4043, AA6061, Metallographic Test, Geometric Test.

# DAFTAR ISI

SURAT PERNYATAAN .....	I
SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	II
LEMBAR PENGESAHAN .....	III
KATA PENGANTAR.....	IV
DAFTAR ISI .....	V
DAFTAR GAMBAR.....	VII
DAFTAR TABEL .....	ix
ABSTRAK.....	x
ABSTRACT .....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1. Latar Belakang.....	1
2. Rumusan Masalah.....	2
3. Tujuan.....	2
4. Batasan Masalah.....	2
5. Sistematika Penulisan .....	2
BAB II STUDI LITERATUR .....	4
1. Penelitian yang dilakukan.....	4
2. <i>Wire Additive Manufacturing</i> (WAAM) .....	5
3. Material AA6061 .....	5
4. Filler Metal ER4043 .....	6
5. Tungsten Inert Gas (TIG) .....	7
BAB III PENGUJIAN GEOMETRI DAN METALOGRAFI .....	9
1. Diagram Alir.....	9
2. Proses WAAM.....	10
3. Pengukuran Geometri .....	16
4. Pembuatan Spesimen Pengujian Metalografi .....	22
5. Pengujian Metalografi .....	23
6. Tempat Penelitian .....	29
BAB IV PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA .....	30
1. Hasil Rata-rata Pengukuran Geometri.....	30

2. Analisis Data.....	32
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	38
1. Kesimpulan .....	38
2. Saran .....	38
DAFTAR PUSTAKA.....	39
LAMPIRAN .....	42



# BAB I PENDAHULUAN

## 1. Latar Belakang

*Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM) adalah teknik manufaktur yang memanfaatkan pencairan logam melalui deposisi energi langsung. Teknik ini menggunakan kawat las sebagai bahan baku dan busur listrik sebagai sumber energi [1]. Proses WAAM memanfaatkan kawat logam sebagai bahan baku.

Kawat las dipanaskan dengan busur listrik hingga mencair dan kemudian diendapkan pada permukaan substrat. Material cair ini kemudian mendingin dan membeku membentuk lapisan material baru.

Robot atau *Computer Numeric Control* (CNC) digunakan untuk melelehkan kawat logam dengan memanfaatkan busur listrik yang terbentuk di antara permukaan bahan dan ujung kawat. WAAM lebih cocok untuk produksi komponen besar dengan tingkat kompleksitas sedang atau rendah, seperti flensa atau panel pagar.

Meskipun memiliki banyak keunggulan, metode WAAM juga memiliki beberapa kendala umum yang sering muncul, yaitu kualitas permukaan yang kurang baik, kecenderungan terjadinya porositas, dan retakan pada ketebalan lapisan pengelasan. Solusi untuk mengatasi permasalahan tersebut dapat dilakukan melalui pengendalian temperatur, optimalisasi parameter pengelasan, dan manajemen material yang cermat.

Keberhasilan penerapan metode WAAM tidak hanya bergantung pada teknologi dan material, tetapi juga pada kemampuan operator dan pemahamannya tentang karakteristik material [2]. Teknik pengelasan *Tungsten Inert Gas* (TIG) atau *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) menggunakan busur api tungsten untuk melelehkan logam tanpa elektrode yang meleleh.

Teknik ini memiliki beberapa keunggulan, yaitu menghasilkan sambungan berkualitas tinggi pada berbagai jenis logam, tidak memerlukan kawat las untuk melindungi sambungan, dan dapat dilakukan secara manual maupun otomatis.

Teknik TIG atau GTAW menggunakan elektrode tungsten dan *gas inert* sebagai pelindung untuk menghasilkan sambungan berkualitas tinggi pada berbagai jenis logam. Pengelasan ini dapat dilakukan secara manual maupun otomatis, tanpa memerlukan kawat las untuk melindungi sambungan.

Teknik GTAW sering digunakan untuk mengelas berbagai jenis logam, termasuk logam ringan seperti *magnesium*, *aluminum*, dan *stainless steel* [3]. Arus merupakan aspek penting dalam proses pengelasan dan penelitian telah dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi arus terhadap kekerasan dan struktur mikro paduan AA6061.

Penelitian ini mengubah variasi arus pengelasan pada 100 A, 110 A, dan 115 A untuk mengetahui bagaimana pengaruhnya terhadap struktur mikro dan kekerasan AA6061. Sampel AA6061 diperiksa sebelum (sebagai bahan mentah) dan sesudah proses pengelasan menggunakan metode TIG dengan batang pengisi ER4043.

Penelitian ini menerapkan metode eksperimental dan analisis data secara deskriptif komparatif. Pengujian struktur mikro dan kekerasan material dilakukan dengan menggunakan mikroskop metalurgi dan penguji kekerasan *Vickers*.

Hasil penelitian menunjukkan penurunan lebar fase Mg<sub>2</sub>Si setelah proses pengelasan. Pada kondisi bahan mentah, fase Mg<sub>2</sub>Si tersebar di sekitar fase  $\alpha$ -Al. Namun, setelah dilakukan pengelasan menggunakan metode TIG dengan variasi arus 100 A, 110 A, dan 115 A, fase Mg<sub>2</sub>Si mengalami penurunan pada setiap sampel, sehingga fase  $\alpha$ -Al mendominasi.

Terdapat variasi yang signifikan dalam nilai kekerasan. Sampel yang dilas dengan arus 110 A menunjukkan tingkat kekerasan tertinggi, yaitu 65,4 VHN, dibandingkan dengan sampel lain yang memiliki nilai 55,7 VHN (arus 100 A) dan 55,9 VHN (arus 115 A). Sebagai perbandingan, nilai kekerasan pada kondisi bahan mentah adalah 120,4 VHN.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa variasi arus pada proses pengelasan memiliki potensi untuk mengubah struktur mikro dan memengaruhi nilai kekerasan *Aluminium Alloy* 6061[4]. Penelitian Rochim Toat Wicaksono menunjukkan bahwa arus pengelasan memiliki pengaruh pada sifat mekanik dan struktur mikro logam yang dilas.

## **2. Rumusan Masalah**

Bagaimana pengaruh kuat arus pada proses WAAM material AA6061 dengan menggunakan logam pengisi ER4043 terhadap pengujian metalografi dan pengukuran geometri deposit kawat las ER4043.

## **3. Tujuan**

Menentukan pengaruh kuat arus pada proses WAAM material AA6061 dengan menggunakan logam pengisi ER4043 terhadap pengujian metalografi dan pengukuran geometri deposit.



#### **4. Batasan Masalah**

Penelitian ini idealnya menggunakan variasi arus yang lebih luas, namun karena keterbatasan waktu dan biaya, penelitian ini hanya menggunakan tiga variasi arus, yaitu 100 A, 110 A, dan 120 A.

#### **5. Sistematika Penulisan**

Pembahasan dan penyajian skripsi ini disusun dalam 5 bab dan disertai dengan lampiran-lampiran. Bab yang dibahas meliputi pendahuluan, studi literatur, hasil dan pembahasan, serta kesimpulan dan saran.

### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini berisi latar belakang masalah, identifikasi masalah, tujuan penelitian, lingkup penelitian dan sistematika penulisan.

### **BAB II STUDI LITERATUR**

Bab ini berisikan tentang ringkasan penelitian yang telah dilakukan oleh orang ladan teori-teori yang menjadikan dasar permasalahan yang akan dibahas sebagai referensi.

### **BAB III PENGUJIAN GEOMETRI DAN METALOGRAFI**

Bab ini berisikan tentang langkah-langkah yang dilakukan untuk menyelesaikan penelitian.

### **BAB IV PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA**

Bab ini berisikan tentang rencana kegiatan dari mulai identifikasi masalah sampai pada anggaran biaya yang prakiraan dalam penelitian “Analisis Geometri dan Metalografi Logam Deposit Hasil Proses WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*) menggunakan GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) dengan Kawat Las ER4043”.

### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini akan membahas mengenai kesimpulan dan saran yang terkait dengan skripsi. Berikut adalah penjelasan singkat mengenai isi dari bab ini adalah. Kesimpulan bagian ini menyajikan ringkasan yang diperoleh dari hasil skripsi serta pembahasan yang telah dilakukan.

### **DAFTAR PUSTAKA**

Berisikan buku acuan dan jurnal sebagai rujukan guna pengembangan laporan skripsi ini, khususnya mengenai laporan skripsi WAAM menggunakan GTAW dengan kawat las ER4043.

### **LAMPIRAN**

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 1. Kesimpulan

- a) Dari proses WAAM dengan menggunakan kawat las ER4041 pada AA6061 menunjukkan bahwa arus sangat memengaruhi, di mana arus 120A lebih banyak terdapat cacat porositas dibandingkan dengan arus 100A dan 110A.
- b) Perubahan arus pada pengelasan memiliki pengaruh langsung terhadap dimensi manik las. Makin tinggi arus yang digunakan, makin rendah tinggi manik las yang dihasilkan. Di sisi lain, makin besar arus yang digunakan, makin lebar pula manik las yang terbentuk.
- c) Pengaruh arus (*current*) pengelasan dalam proses TIG dengan *filler metal* ER4043 tidak hanya berdampak pada geometri dan konsistensi manik las, tetapi juga berpengaruh terhadap struktur mikro yang terbentuk. Meskipun demikian, cacat porositas masih terdeteksi pada semua variasi arus.

### 2. Saran

Untuk proses pengelasan GTAW yang berbasis WAAM, sebaiknya dilakukan perancangan percobaan untuk penentuan parameter proses pengelasan sesuai dengan material kawat las agar dapat meminimalisir cacat pada hasil pengelasan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Dinovitzer, X. Chen, J. Laliberte, X. Huang, and H. Frei, "Effect of Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process Parameters on Bead Geometry and Microstructure," *Addit.Manuf.*, vol. 26, pp. 138–146, 2019.
- [2] A. Horgar, H. Fostervoll, B. Nyhus, X. Ren, M. Eriksson, and O. M. Akselsen, "Additive Manufacturing using WAAM with AA5183 Wire," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 259, no. November 2017, pp. 68–74, 2018, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.04.014.
- [3] W. Pranajaya, A. Wibawa Budi Santosa, and U. Budiarto, "Analisa Pengaruh Variasi Kampuh Las dan Arus Listrik terhadap Kekuatan Tarik dan Struktur Mikro Sambungan Las TIG (Tungsten Inert Gas) pada Aluminium 6061," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 7, no. 4, p. 286, 2019, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>.
- [4] R. T. Wicaksono, S. Suharno, and B. Harjanto, "Pengaruh Kuat Arus pada Pengelasan Paduan Aluminium 6061 dengan menggunakan Metode Las TIG terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro," *Nozel J. Pendidik. Tek. Mesin*, vol. 1, no. 1, p. 37, 2019, doi: 10.20961/nozel.v1i1.28484.
- [5] A. Sentana, D. Lazuardi, M. Jodi. Maulidio, and M. Reza. Hermawan, "Kaji Eksperimen Manik Las Hasil Proses Pengelasan Tungsten Inert Gas (TIG) menggunakan Kawat Las ER5356 untuk Manufaktur Aditif," vol. 13, no. 3, pp. 195–200.
- [6] A. Astarita, A. Squillace, and L. Nele, "Mechanical Characteristics of Welded Joints of Aluminum Alloy 6061 T6 Formed by ARC and Friction Stir Welding," *Met. Sci. Heat Treat.*, vol. 57, no. 9–10, pp. 564–569, 2016, doi: 10.1007/s11041-016-9923-9.
- [7] S. Iii, A. Kuch, and Y. Jalmaf, "Analisis Pengaruh Variasi Besar Arus dan Kecepatan Pengelasan terhadap Pengujian Tekuk / Bending dan Struktur Makro pada Material Aluminium 6061 dengan Proses Pengelasan TIG (GTAW)," *Seiminar Nas. Teknol. Ind. Berkelanjutan III*, no. Senastitan Iii, pp. 1–10, 2023.
- [8] S. Singh and P. Khanna, "Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM): A New Process to Shape Engineering Materials," *Mater. Today Proc.*, vol. 44, no. 8, pp. 118–128, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.030.
- [9] S. Dahat, K. Hurtig, J. Andersson, and A. Scotti, "A Methodology to Parameterize Wire + Arc Additive Manufacturing : A Case Study for Wall Quality Analysis," *Manuf.*

- Mater. Process.*, 2020, doi: 10.3390/jmmp4010014.
- [10] A. Shah, R. Aliyev, H. Zeidler, and S. Krinke, "A Review of the Recent Developments and Challenges in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process," *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 7, no. 3, 2023, doi: 10.3390/jmmp7030097.
- [11] 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," *Results Eng.*, vol. 13, no. September 2021, p. 100330, 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2021.100330.
- [12] S. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, and P. Colegrove, "Wire + Arc Additive Manufacturing," *Mater. Sci. Technol. (United Kingdom)*, vol. 32, no. 7, pp. 641–647, 2016, doi: 10.1179/1743284715Y.0000000073.
- [13] B. Wu *et al.*, "A Review of the Wire Arc Additive Manufacturing of Metals: Properties, Defects and Quality Improvement," *J. Manuf. Process.*, vol. 35, no. August, pp. 127–139, 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.
- [14] C. Shen, Z. Pan, D. Cuiuri, D. Ding, and H. Li, "Influences of Deposition Current and Interpass Temperature to the Fe<sub>3</sub>Al-Based Iron Aluminide Fabricated Using Wire-Arc Additive Manufacturing Process," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 88, no. 5–8, pp. 2009–2018, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-8935-3.
- [15] N. Hussein, G. C. Ket, T. A. Rahim, M. Ayof, M. Abidin, and J. Srithorn, "Process and Heat Resources for Wire Arc Additive Manufacturing of Aluminium Alloy ER4043: A Review," *J. Mech. Eng.*, vol. 20, no. 1, pp. 21–41, 2023.
- [16] S. Mochammad, S. Subowo, "Perbedaan Sifat Mekanik Hasil Penyambungan Las GTAW pada Aluminium 6061 dengan Filler ER4043 dan ER5356," *J. Tek. Mesin*, pp. 1–8, 2014, [Online]. Available: <http://digilib.its.ac.id/public/ITS-paper-38740-2109030088-Paper.pdf>.
- [17] S. Venukumar, S. Yalagi, and S. Muthukumar, "Novel Approach to Refill Probe Hole in Friction Stir Spot Welding of AA 6061-T6 sheets." *Woodhead Publishing Limited*, 2013.
- [18] A. Kareem, A. Qudeiri, A. Abdudeen, T. Ahammed, and A. Ziout, "A Review on AA 6061 Metal Matrix Composites Produced by Stir Casting," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 1, pp. 1–22, 2021, doi: 10.3390/ma14010175.

- [19] S. Rajakumar, C. Muralidharan, and V. Balasubramanian, "Establishing Empirical Relationships to Predict Grain Size and Tensile Strength of Friction Stir Welded AA 6061-T6 Aluminium Alloy Joints," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 20, no. 10, pp. 1863–1872, 2010, doi: 10.1016/S1003-6326(09)60387-3.
- [20] A. Jukliv and P. Yoedhawan, "Analisis Kekerasan, Cacat Las, dan Struktur Mikro pada Sambungan T Paduan Aluminium 6061 T6511 Hasil Gas Metal Arc Welding (GMAW) dengan Variasi Kuat Arus," *Rotor*, vol. 7, no. November, pp. 1–8, 2014.
- [21] M. Khudadad and E. N. Farhan, "Corrosion Resistance of TIG Welding Joint for Aluminium Alloy 6061- T6 in Sea Water at Different Velocities," *J. Eng. Dev.*, vol. 18, no. 6, pp. 113–125, 2014.
- [22] 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, 2023.
- [23] Z. Nurisna and E. Setiawan, "Pengaruh Filler pada Pengelasan TIG Baja Karbon dan Stainless Steel 316L terhadap Sifat Mekanik," *Quantum Tek. J. Tek. Mesin Terap.*, vol. 1, no. 2, pp. 95–99, 2020, doi: 10.18196/jqt.010214.
- [24] K. Steve. Derekar, "A Review of Wire Arc Additive Manufacturing and Advances in Wire Arc Additive Manufacturing Of Aluminium," *Mater. Sci. Technol. (United Kingdom)*, vol. 34, no. 8, hal. 895–916, 2018.
- [25] M. R. Hikmatullah, P. Yunesti, E. Pujiyulianto, A. Nurdin, and F. Paundra, "Rancang Bangun Mesin Las TIG Semi Otomatis Berbasis Arduino Uno," *J. Mech. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 35–40, 2021, doi: 10.31002/jom.v5i1.3945.
- [26] Z. Yang, J. Li, S. Hou, J. Cao, and G. Wang, "Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of Ti-6Al-2Nb-2Zr-0.4B Alloy Welded Joint using Tungsten Inert Gas Welding," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 21, pp. 3129–3139, 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.10.138.
- [27] A. Ardjo, Suryanto, Rofarsyam, Sulasih, "Rancang Bangun Perangkat Praktikum Pengujian Geometris Kelurusan dan Kesilindrisan," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 13, no. 1, pp. 7–13, 2018.
- [28] D. Riyanindito, A. Sentana, and T. Supriyono, "Pembuatan Alat Bantu Pemindah Tabung LPG 12 Kg," Universitas Pasundan Bandung, 2019.

- [29] I. Kurniawan, R. Dewi Anjani, and R. Hanifi, “Analisa Sambungan Pengelasan Gas Metal Arc Welding (GMAW) menggunakan Pengujian Metalografi,” *J. Ilm. Wahana Pendidik.*, vol. 22, no. 8, pp. 99–108, 2022,
- [30] M. Raeissi and S. H. Nourbaksh, “Enhancement of the Microstructure Homogeneity and Mechanical Performance of the As-Cast Mg/Mg<sub>2</sub>Si In-Situ Composite Through Friction Stir Processing,” *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 10, 2019, doi: 10.1088/2053-1591/ab40fd.

