

**Karakterisasi pengunci sambungan sepeda lipat hasil  
pengelasan GTAW berbasis *additive manufacturing***

***Characterization of foldable bicycle joint locks resulting  
from GTAW welding based on additive manufacturing***

**SKRIPSI**

**Oleh:**

**Nama: Fauzi Alvia Arif Nugroho**

**NPM: 183030026**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS PASUNDAN  
BANDUNG  
2025**

## SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini,

N a m a : Fauzi Alvia Arif Nugroho

Nomor Pokok Mahasiswa : 183030026

Program Studi : Teknik Mesin FT UNPAS

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Dalam Skripsi yang saya kerjakan ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan/ditulis oleh orang lain untuk memperoleh gelar dari suatu perguruan tinggi,
2. Sepanjang pengetahuan saya, tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis dan diterbitkan oleh orang lain kecuali yang secara tertulis diacu/dikutip/disitasi dalam naskah ini dan disebutkan dalam referensi,
3. Naskah laporan skripsi yang ditulis bukan dilakukan secara *copy paste* dari karya orang lain dan mengganti beberapa kata yang tidak perlu.
4. Naskah laporan skripsi bukan hasil *plagiarism*.

Apabila dikemudian hari terbukti bahwa pernyataan ini tidak benar maka saya sanggup menerima hukuman/sanksi apapun sesuai peraturan yang berlaku.

Bandung, 25 Juni 2025

Penulis,



Fauzi Alvia Arif Nugroho

## SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini, sebagai sivitas akademik Universitas Pasundan, saya:

N a m a : Fauzi Alvia Arif Nugroho

NPM : 183030026

Program Studi : Teknik Mesin FT UNPAS

Jenis Karya : Skripsi

Menyatakan bahwa sebagai pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, saya menyetujui memberikan kepada Universitas Pasundan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif atas karya ilmiah saya yang berjudul:

“Karakterisasi pengunci sambungan sepeda lipat hasil pengelasan GTAW berbasis *additive manufacturing*”

Beserta perangkat yang ada (jika ada). Dengan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif ini Universitas Pasundan berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pakalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Bandung, 25 Juni 2025 Yang

menyatakan,



Fauzi Alvia Arif Nugroho

## LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

### Karakterisasi Pengunci Sambungan Sepeda Lipat Hasil Pengelasan GTAW Berbasis *Additive Manufacturing*



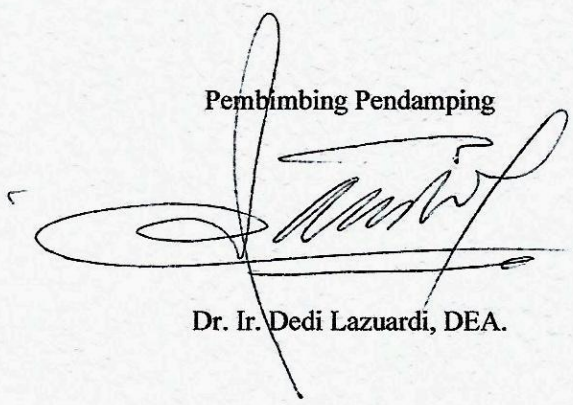
Nama: Fauzi Alvia Arif Nugroho  
NPM: 183030026

Pembimbing Utama



Ir. Agus Sentana, M.T.

Pembimbing Pendamping



Dr. Ir. Dedi Lazuardi, DEA.

## LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

### Karakterisasi Pengunci Sambungan Sepeda Lipat Hasil Pengelasan GTAW Berbasis *Additive Manufacturing*



Nama: Fauzi Alvia Arif Nugroho  
NPM: 183030026

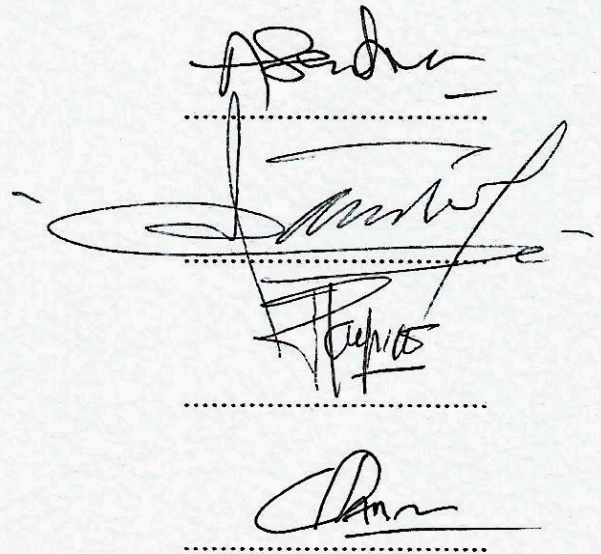
Tanggal sidang skripsi: Rabu, 25 Juni 2025

Ketua : Ir. Agus Sentana, M.T.

Sekretaris : Dr. Ir. Dedi Iazuardi, DEA.

Anggota : Dr. Ir. Rachmad Hartono, M.T.

Anggota : Dr. Ir. Syahbardia, M.T.



## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT dengan segala limpahan rahmat dan karunianya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Karakterisasi pengunci sambungan sepeda lipat hasil pengelasan GTAW berbasis *additive manufacturing*”** ini dapat diselesaikan dengan baik. Dalam penyusunan dan penulisan skripsi ini masih terdapat kekurangan dan jauh dari sempurna, karena dibatasi oleh kemampuan penulis sendiri. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua tercinta dan keluarga yang telah memberikan do'a, dukungan, dan semangat serta membantu secara moral dan material sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak Dr. Ir. Sugiharto, M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Pasundan.
3. Bapak Ir. Agus Sentana, M.T. selaku dosen pembimbing utama yang dengan sukarela menyediakan waktu dan perhatian untuk memberikan bimbingan, arahan, serta dukungan kepada penulis.
4. Bapak Dr. Ir. Dedi Lazuardi, DEA. selaku dosen pembimbing pendamping yang dengan sukarela menyediakan waktu dan perhatian untuk memberikan bimbingan, arahan, serta dukungan kepada penulis.
5. Bapak Dr. Ir. Muki Satya Permana, M.T. selaku dosen wali yang memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis sejak awal hingga akhir perkuliahan di Universitas Pasundan.
6. Rekan - rekan seperjuangan, khususnya teknik mesin angkatan 2018.

Semoga Allah SWT memberikan imbalan yang berlimpah ganda atas semua kebaikan yang telah diberikan kepada penulis. Serta semoga laporan ini memberikan manfaat kepada penulis khususnya dan kepada pembaca umumnya.

Bandung, 25 Juni 2025

Penulis,



Fauzi Alvia Arif Nugroho

## DAFTAR ISI

|                                                                 |             |
|-----------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>SURAT PERNYATAAN.....</b>                                    | <b>i</b>    |
| <b>SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....</b>              | <b>ii</b>   |
| <b>LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING .....</b>                       | <b>iii</b>  |
| <b>LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....</b>                           | <b>iv</b>   |
| <b>KATA PENGANTAR.....</b>                                      | <b>v</b>    |
| <b>DAFTAR ISI .....</b>                                         | <b>vii</b>  |
| <b>DAFTAR GAMBAR.....</b>                                       | <b>x</b>    |
| <b>DAFTAR TABEL .....</b>                                       | <b>xi</b>   |
| <b>ABSTRAK.....</b>                                             | <b>xii</b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                            | <b>xiii</b> |
| <b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>                                  | <b>1</b>    |
| 1. Latar belakang.....                                          | 1           |
| 2. Rumusan masalah.....                                         | 2           |
| 3. Tujuan.....                                                  | 2           |
| 4. Manfaat.....                                                 | 2           |
| 5. Batasan masalah .....                                        | 2           |
| 6. Sistematika penulisan .....                                  | 2           |
| <b>BAB II STUDI LITERATUR .....</b>                             | <b>4</b>    |
| 1. <i>Additive manufacturing</i> .....                          | 4           |
| 2. <i>Wire arc additive manufacturing</i> .....                 | 4           |
| 3. Pengelasan GTAW berbasis <i>additive manufacturing</i> ..... | 7           |
| 4. Metalurgi pengelasan GTAW .....                              | 11          |
| 5. <i>Filler metal</i> .....                                    | 12          |

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 6. Pengunci sambungan sepeda lipat hasil pengelasan GTAW ..... | 14        |
| 7. Pengujian metalografi.....                                  | 15        |
| 8. Pengujian kekerasan.....                                    | 15        |
| <b>BAB III METODOLOGI.....</b>                                 | <b>19</b> |
| 1. Rancangan penelitian.....                                   | 19        |
| 2. Tahapan penelitian .....                                    | 19        |
| 3. Tempat penelitian .....                                     | 22        |
| 4. Setup pengukuran/pengujian.....                             | 22        |
| 5. Alat ukur dan material yang digunakan.....                  | 25        |
| 6. Metode pengolahan data hasil pengujian.....                 | 29        |
| <b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>                        | <b>34</b> |
| 1. Pengujian struktur mikro .....                              | 34        |
| A. Pembahasan .....                                            | 34        |
| B. Perbandingan dengan penelitian sebelumnya .....             | 35        |
| C. Diskusikan kelebihan dan keterbatasan.....                  | 36        |
| 2. Pengujian kekerasan <i>vickers</i> .....                    | 36        |
| A. Hasil pengujian .....                                       | 36        |
| B. Pembahasan .....                                            | 38        |
| C. Perbandingan dengan penelitian sebelumnya .....             | 42        |
| <b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>                        | <b>43</b> |
| 1. Kesimpulan .....                                            | 43        |
| 2. Saran.....                                                  | 43        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>                                    | <b>45</b> |
| <b>LAMPIRAN .....</b>                                          | <b>49</b> |
| 1. Data hasil pengujian .....                                  | 49        |
| 2. Foto-foto kegiatan .....                                    | 50        |
| 3. Laporan hasil pengujian struktur mikro di B4T .....         | 52        |

|    |                                                       |    |
|----|-------------------------------------------------------|----|
| 4. | Laporan hasil pengujian kekerasan vickers di B4T..... | 55 |
| 5. | Gambar teknik.....                                    | 56 |
| 6. | Sertifikat welder .....                               | 57 |



## DAFTAR GAMBAR

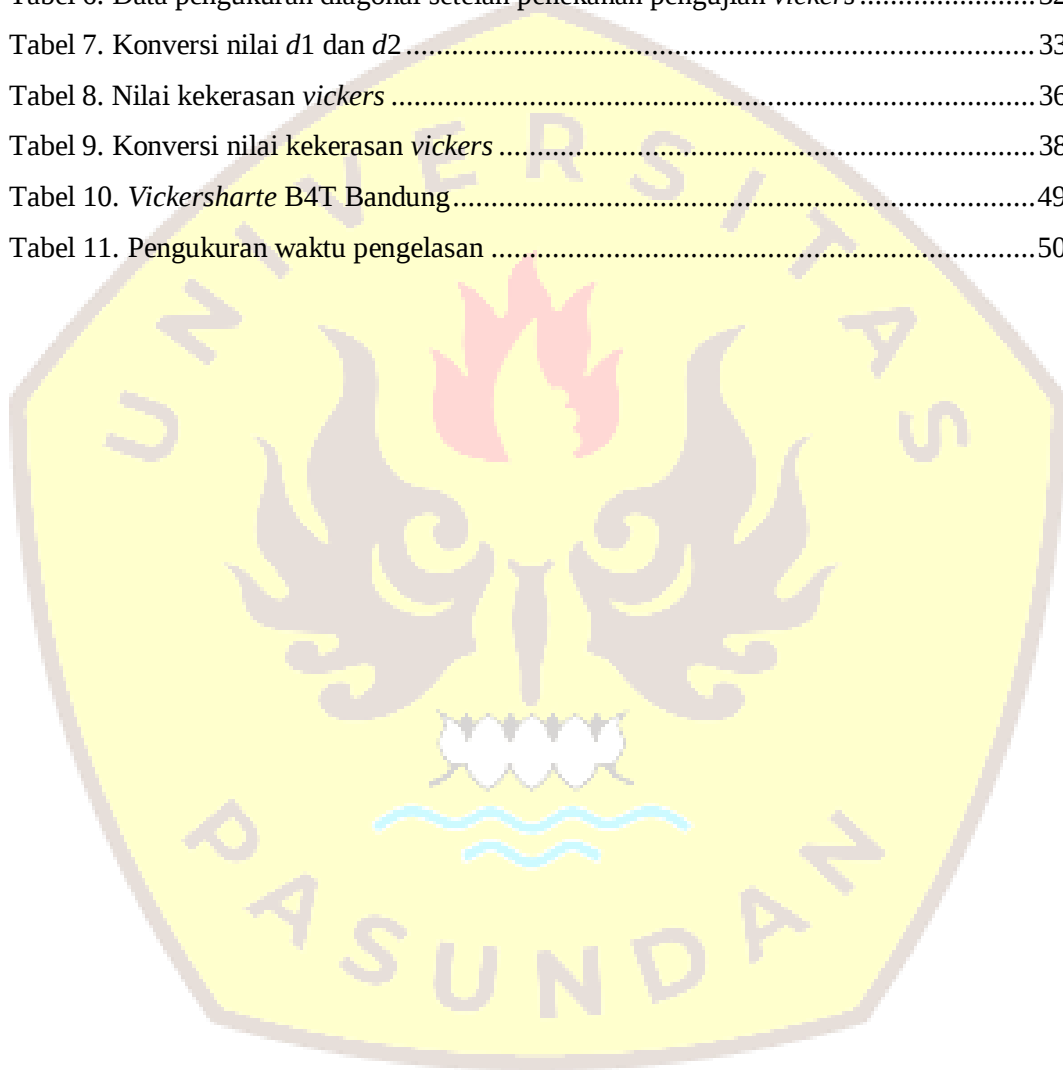
|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 1. Proses <i>additive manufacturing</i> [5] .....                                            | 4  |
| Gambar 2. Mekanisme proses WAAM [11] .....                                                          | 5  |
| Gambar 3. Jenis proses pengelasan WAAM, A) GTAW; B) PAW; C) GMAW [4].....                           | 6  |
| Gambar 4. Proses pengelasan GTAW [15].....                                                          | 7  |
| Gambar 5. Pengelasan GTAW berbasis <i>additive manufacturing</i> [17] .....                         | 9  |
| Gambar 6. Contoh pengunci sambungan sepeda lipat .....                                              | 14 |
| Gambar 7. Struktur mikro paduan aluminium [27] .....                                                | 15 |
| Gambar 8. Metode pengujian kekerasan [28] .....                                                     | 16 |
| Gambar 9. Skematis proses pengujian kekerasan <i>vickers</i> [31] .....                             | 18 |
| Gambar 10. Diagram alir penelitian .....                                                            | 20 |
| Gambar 11. Lokasi penelitian B4T Bandung [32] .....                                                 | 22 |
| Gambar 12. Gambar teknik pengunci sambungan sepeda lipat .....                                      | 22 |
| Gambar 13. Spesimen uji.....                                                                        | 24 |
| Gambar 14. Spesimen uji hasil preparasi .....                                                       | 24 |
| Gambar 15. Spesimen hasil pengujian kekerasan <i>vickers</i> .....                                  | 25 |
| Gambar 16. Ragum .....                                                                              | 25 |
| Gambar 17. Gergaji tangan.....                                                                      | 26 |
| Gambar 18. Resin untuk <i>mounting</i> .....                                                        | 26 |
| Gambar 19. Mesin <i>hot mounting</i> .....                                                          | 27 |
| Gambar 20. Mesin grinding atau poles.....                                                           | 27 |
| Gambar 21. Mikroskop metalurgi (Olympus BX53M) .....                                                | 28 |
| Gambar 22. Mesin <i>hardness test</i> (Zwick 3202).....                                             | 28 |
| Gambar 23. Hasil pengujian A) Makro; B) Mikro pembesaran 200x.....                                  | 29 |
| Gambar 24. Titik indentasi pengujian kekerasan mikro <i>vickers</i> .....                           | 31 |
| Gambar 25. Contoh diagonal 1 ( $d_1$ ) dan diagonal 2 ( $d_2$ ) pada pengujian <i>vickers</i> ..... | 31 |
| Gambar 26. Hasil pengujian A) Pengamatan makro; B) Pengamatan mikro 200x .....                      | 34 |
| Gambar 27. A) Hasil pengujian HV; B) Grafik nilai HV .....                                          | 39 |
| Gambar 28. Hasil pengamatan struktur mikro pada titik indentasi 1 .....                             | 39 |
| Gambar 29. Hasil pengamatan struktur mikro pada titik indentasi 2 .....                             | 40 |
| Gambar 30. Hasil pengamatan struktur mikro pada titik indentasi 3 .....                             | 40 |
| Gambar 31. Hasil pengamatan struktur mikro pada titik indentasi 4 .....                             | 41 |
| Gambar 32. Hasil pengamatan struktur mikro pada titik indentasi 5 .....                             | 41 |
| Gambar 33. Proses poles pada pengujian struktur mikro .....                                         | 50 |
| Gambar 34. Penentuan diagonal 1 dan 2 pengujian kekerasan <i>vickers</i> .....                      | 50 |
| Gambar 35. Beban yang digunakan pada pengujian <i>vickers</i> .....                                 | 51 |

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 36. Resin yang digunakan pada pengujian metalografi.....          | 51 |
| Gambar 37. Laporan pengujian struktur mikro .....                        | 52 |
| Gambar 38. Laporan hasil pengamatan struktur mikro pembesaran 100x ..... | 53 |
| Gambar 39. Laporan hasil pengamatan struktur mikro pembesaran 200x ..... | 54 |
| Gambar 40. Laporan hasil pengujian kekerasan <i>vickers</i> .....        | 55 |
| Gambar 41. Pengunci sambungan sepeda lipat.....                          | 56 |
| Gambar 42. Sertifikat welder B4T Bandung .....                           | 57 |



## DAFTAR TABEL

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 1. Karakteristik gas argon [10] .....                                        | 10 |
| Tabel 2. Gas pelindung untuk pengelasan GTAW [10] .....                            | 10 |
| Tabel 3. Komposisi kimia <i>filler metal</i> ER4043 [11] .....                     | 12 |
| Tabel 4. Kisaran kuat arus <i>filler metal</i> .....                               | 13 |
| Tabel 5. Komposisi kimia Al6061 .....                                              | 14 |
| Tabel 6. Data pengukuran diagonal setelah penekanan pengujian <i>vickers</i> ..... | 32 |
| Tabel 7. Konversi nilai <i>d1</i> dan <i>d2</i> .....                              | 33 |
| Tabel 8. Nilai kekerasan <i>vickers</i> .....                                      | 36 |
| Tabel 9. Konversi nilai kekerasan <i>vickers</i> .....                             | 38 |
| Tabel 10. <i>Vickersharte</i> B4T Bandung .....                                    | 49 |
| Tabel 11. Pengukuran waktu pengelasan .....                                        | 50 |



## ABSTRAK

Perkembangan teknologi Additive Manufacturing (AM) membuka peluang baru dalam pembuatan komponen mekanik bergeometri kompleks dengan efisiensi material yang tinggi. Salah satu metode yang menjanjikan adalah Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) berbasis proses Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) dengan aluminium ER4043. Material tersebut kemudian dibentuk lapis demi lapis hingga mencapai bentuk yang diinginkan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi struktur mikro dan kekerasan vickers pengunci sambungan sepeda lipat yang dibuat dengan proses pengelasan Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) berbasis Additive Manufacturing (AM). Pengujian dilakukan melalui observasi struktur mikro menggunakan mikroskop optik serta uji kekerasan Vickers (HV) pada lima titik uji dari lapisan bawah hingga lapisan atas. Hasil pengamatan menunjukkan variasi struktur mikro berupa butir dendrit kolumnar dan ekuiaksial yang terbentuk pada zona berbeda, serta cacat porositas pada beberapa area. Lapisan bawah didominasi bentuk butir kolumnar berukuran besar akibat efek *reheating*, Lapisan tengah memperlihatkan campuran bentuk dendrit kolumnar dan dendrit ekuiaksial yang lebih halus. Pada lapisan atas kembali menunjukkan bentuk dendrit kolumnar disertai porositas. Nilai kekerasan tertinggi tercatat sebesar 42,5 HV pada layer 10 atau lapisan tengah yang memiliki struktur lebih halus dan padat, sedangkan nilai terendah sebesar 39,1 HV pada layer 5 atau lapisan bawah akibat efek reheating pertumbuhan butir jadi lebih besar. Rata-rata nilai kekerasan ER4043 adalah 40,46 HV, jauh lebih rendah dibanding aluminium alloy 6061 yang umumnya digunakan pada pengunci sepeda lipat (sekitar 110-120 HV), karena ER4043 termasuk paduan non-heat-treatable berbasis Al-Si. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengelasan GTAW berbasis WAAM dapat menghasilkan komponen pengunci sambungan dengan integritas struktural yang cukup baik. Namun, masih diperlukan optimasi parameter proses untuk mengurangi porositas, meningkatkan homogenitas butir, dan memperbaiki sifat mekanik agar mendekati material konvensional yang digunakan pada sepeda lipat.

kata kunci: additive manufacturing, GTAW, WAAM, ER4043, sepeda lipat, struktur mikro, kekerasan vickers.

## ABSTRACT

*The development of Additive Manufacturing (AM) technology enables the fabrication of components with complex geometries and high material efficiency. One promising method is Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) based on the Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) process, utilizing ER4043 aluminum alloy as the filler material. This study aims to characterize the microstructure and Vickers microhardness of a folding bicycle joint lock fabricated using GTAW-based AM. Microstructural observations were conducted using an optical microscope, and Vickers microhardness measurements were taken at five test points from the bottom to the top layer. The results revealed morphological variations between layers. The bottom layer was dominated by large columnar dendrites due to the reheating effect, the middle layer exhibited a mixture of finer columnar and equiaxed dendrites, while the top layer again showed columnar dendrites accompanied by porosity. The highest hardness value was 42.5 HV in the middle layer with fine and dense microstructure, whereas the lowest was 39.1 HV in the bottom layer due to coarser grain growth. The average hardness was 40.46 HV, which is lower than that of conventional 6xxx aluminum alloys used in folding bicycle components, as ER4043 is a non-heat-treatable Al-Si alloy. The findings indicate that GTAW-based WAAM can produce joint lock components with adequate structural integrity. However, process parameter optimization is necessary to reduce porosity, improve grain homogeneity, and enhance mechanical properties to match those of conventional materials used in folding bicycles.*

**Keywords:** *additive manufacturing, WAAM, GTAW, folding bicycles, microstructure, Vickers hardness.*



# BAB I PENDAHULUAN

## 1. Latar belakang

*Additive Manufacturing* telah menjadi teknologi manufaktur yang berkembang pesat, khususnya dalam industri logam yang membutuhkan desain kompleks dan efisiensi material tinggi. Salah satu metode *additive manufacturing* yang menjanjikan adalah *wire arc additive manufacturing*, yang menggunakan proses pengelasan busur listrik untuk mencetak objek secara lapis demi lapis [1]. WAAM memanfaatkan proses pengelasan seperti *gas tungsten arc welding* untuk mencairkan kawat logam sebagai bahan baku utama, sehingga dinilai lebih hemat biaya dibandingkan metode berbasis serbuk logam [2].

Keunggulan WAAM terletak pada tingginya laju deposisi, biaya peralatan yang rendah, serta kemampuan untuk mencetak komponen besar dengan kompleksitas geometris tinggi [3]. Namun demikian, proses ini juga menyisakan tantangan teknis, seperti porositas, retak termal, distorsi bentuk, dan variasi mikrostruktur yang tidak seragam khususnya pada logam seperti aluminium yang sangat sensitif terhadap panas [4]. Studi oleh Horgar et al. (2018) menyebutkan bahwa salah satu kendala utama pada WAAM berbahan aluminium adalah kecenderungan terbentuknya porositas internal akibat kontrol parameter yang tidak optimal [5].

Dalam konteks penerapannya, komponen struktural seperti pengunci sambungan pada sepeda lipat harus memiliki kekuatan mekanik dan ketahanan terhadap beban dinamis yang tinggi. Pengunci ini berfungsi sebagai titik sambung utama yang menentukan keselamatan pengguna, sehingga kualitas sambungan tidak boleh dikompromikan. Meskipun telah dilakukan penelitian pembuatan pengunci sambungan sepeda lipat hasil pengelasan GTAW dengan metode WAAM secara manual menggunakan arus sebesar 90A, evaluasi karakteristik mekanik dan mikrostruktur masih belum dilakukan secara mendalam [6].

Karakterisasi tersebut sangat penting, sebab sifat mikrostruktur dan kekerasan permukaan sangat memengaruhi ketahanan sambungan. Studi oleh Sholichuddin dan Subowo (2014) menunjukkan bahwa pengelasan aluminium 6061 dengan filler ER4043 menghasilkan variasi kekerasan yang signifikan pada zona las, zona HAZ, dan logam induk [16]. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk mengetahui bagaimana struktur mikro dan kekerasan pada produk pengunci sambungan yang dihasilkan melalui pengelasan GTAW berbasis WAAM.

## 2. Rumusan masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan sebelumnya, rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana struktur mikro dan kekerasan pada pengunci sambungan sepeda lipat diperoleh dari hasil pengelasan GTAW berbasis *additive manufacturing*?

## 3. Tujuan

Merujuk pada latar belakang dan perumusan masalah yang telah diuraikan di atas, tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah menganalisis struktur mikro dan nilai kekerasan mikro *vickers* pada pengunci sambungan sepeda lipat hasil pengelasan GTAW berbasis *additive manufacturing*.

## 4. Manfaat

Jika tujuan pengembangan ini mencapai hasil positif, maka akan diperoleh manfaat antara lain:

- A. Memperkaya wawasan dan ilmu pada kemajuan teknologi, khususnya di bidang pengelasan GTAW berbasis AM.
- B. Dapat berkontribusi pada pengembangan teknologi material baru yang lebih efisien dan berkualitas tinggi, dengan memanfaatkan keunggulan dari kedua metode pengelasan dan AM.
- C. Secara khusus dapat mengetahui sifat material manufaktur aditif dengan metode pengelasan GTAW.
- D. Menjadi landasan awal untuk penelitian lanjutan mengenai parameter optimal dalam proses WAAM berbasis pengelasan GTAW.

## 5. Batasan masalah

Batasan masalah dari penelitian ini dapat mencakup beberapa aspek, di antaranya:

- A. Spesimen yang dianalisis hasil pengelasan GTAW berbasis *Additive Manufacturing*.
- B. Parameter proses dipilih arus pengelasan sebesar 90 ampere.
- C. Pengujian terbatas karakteristik struktur mikro dan pengujian kekerasan mikro *vickers*.

## 6. Sistematika penulisan

Sistematika penulisan penelitian ini terdiri atas 5 (lima) bab, daftar pustaka, dan lampiran diantaranya:

**BAB I PENDAHULUAN:** Pada bab ini dibahas tentang latar belakang yang menjadi permasalahan secara umum dan khusus penelitian ini dilakukan, perumusan masalah penelitian, tujuan penelitian, batasan penelitian, dan manfaat penelitian ini.

**BAB II STUDI LITERATUR:** Pada bab ini dibahas tentang penelitian terdahulu dan teori yang berhubungan dan mendukung dalam melaksanakan penelitian. Bab ini membahas prototipe pendahulu, pengertian *additive manufacturing*, pengelasan GTAW berbasis *additive manufacturing*, serta literatur yang berkaitan dan menunjang pada penelitian ini.

**BAB III METODOLOGI PENELITIAN:** Pada bab ini dibahas tentang prosedur yang dilakukan untuk mencapai tujuan dari penelitian ini.

**BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN:** Pada bab ini dibahas tentang tahapan dan pengujian, serta hasil dari karakteristik sambungan pengunci sepeda lipat hasil pengelasan GTAW berbasis *additive manufacturing*. Penjelasan hasil eksperimen berupa tabel dan gambar hasil pengujian pada variabel eksperimen yang telah ditetapkan.

**BAB V PENUTUP:** Pada bab ini dibahas tentang kesimpulan dan saran mengenai hal penting yang diperoleh berdasarkan dari hasil analisis dan pengujian, yang merupakan jawaban dari permasalahan yang menjadi topik dalam penelitian.

**DAFTAR PUSTAKA:** Pada bab ini dibahas tentang buku acuan atau artikel yang digunakan dalam laporan penelitian.

**LAMPIRAN:** Bab ini berisi tentang data hasil pengujian struktur mikro dan uji kekerasan *vickers*, foto-foto kegiatan, laporan hasil pengujian di B4T Bandung, gambar teknik, dan sertifikat welder.

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan terhadap hasil pengelasan GTAW berbasis *additive manufacturing* dengan kuat arus sebesar 90 ampere dan *filler metal* yang digunakan ER4043 dapat disimpulkan hasil pengamatan makro didapat jumlah layer pada penelitian ini sebesar 15 layer. Hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan variasi bentuk struktur mikro. Struktur mikro yang terbentuk terdiri dari tiga zona utama, yaitu dendritik kasar, zona transisi, dan zona ekuiaksial. Zona dendritik kasar pada layer 12 sampai layer 14 dengan ukuran butir besar akibat pendinginan lambat. Zona transisi pada layer 9 dan layer 10 bentuk dendrit yang mulai menyempit dan pertumbuhan butir acak. Zona ekuiaksial pada layer 1 sampai dengan layer 5 bentuk dendrit lebih halus yang terbentuk karena pendinginan cepat. Perbedaan antar zona ini dipengaruhi oleh variasi laju pendinginan selama proses deposisi, yang mempengaruhi ukuran butir, orientasi pertumbuhan, dan distribusi fasa.

Hasil uji kekerasan mikro *Vickers* pada pengujian ini menunjukkan nilai kekerasan rata-rata sebesar 40,46 HV dengan nilai kekerasan tertinggi terdapat pada titik indentasi ketiga, sebesar 42,5 HV pada layer 9 yang memiliki distribusi butir lebih merata dan ukuran butir lebih halus. Sementara itu, nilai kekerasan terendah terdapat pada titik indentasi pertama sebesar 39,1 HV ditemukan pada layer 5 yang mengalami pertumbuhan dendrit lebih kasar akibat efek *reheating* berulang dan adanya porositas yang dapat menjadi titik awal retak. Material yang digunakan pengunci sambungan sepeda lipat yang dijual di pasaran umumnya paduan aluminium 6061 memiliki nilai kekerasan sebesar 110 HV sampai 120 HV yang telah mengalami perlakuan panas. Jika dibandingkan dengan paduan aluminium 6061, ER4043 menunjukkan perbedaan signifikan memiliki nilai kekerasan jauh lebih rendah, karena sifatnya paduan *non-heat-treatable* berbasis Al-Si yang tidak mengalami penguatan presipitasi. Perbedaan ini menandakan bahwa meskipun ER4043 dapat digunakan dalam proses AM, sifat mekaniknya belum optimal untuk aplikasi struktural yang memerlukan kekuatan tinggi tanpa adanya perlakuan tambahan.

### 2. Saran

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan menunjukkan hasil yang baik mengenai karakteristik pengunci sambungan sepeda lipat hasil pengelasan GTAW berbasis *additive manufacturing*, terdapat beberapa saran yang kiranya perlu untuk dilakukan. Saran tersebut diantaranya:

A. Optimalisasi parameter AM

Melakukan variasi parameter proses AM, seperti pengaturan arus las, kecepatan deposisi, pola pengisian, dan jenis gas pelindung, untuk mengendalikan pertumbuhan butir dan meminimalkan cacat mikro seperti porositas.

B. Uji mekanik tambahan

Melakukan pengujian sifat mekanik lain seperti uji tarik, uji impak, dan uji kelelahan, guna mengetahui ketahanan struktural dan performa komponen pengunci saat digunakan dalam kondisi beban nyata.

C. Pengaruh *post-processing*

Disarankan penambahan uji pengaruh perlakuan panas (*heat treatment*) untuk homogenitas struktur mikro dan peningkatan sifat mekanik pada komponen hasil AM.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Karayel and Y. Bozkurt, "Additive manufacturing method and different welding applications," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 5, pp. 11424–11438, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.08.039.
- [2] 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, no. May, pp. 138–146, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.addma.2018.12.013.
- [3] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, and P. Colegrove, "Wire arc additive manufacturing," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 7, pp. 641–647, May 2016, doi: 10.1179/1743284715Y.0000000073.
- [4] M. Chaturvedi, E. Scutelnicu, C. C. Rusu, L. R. Mistodie, D. Mihailescu, and A. V. Subbiah, "Wire arc additive manufacturing: review on recent findings and challenges in industrial applications and materials characterization," *Metals (Basel)*, pp. 1–39, 2021, doi: 10.3390/met11060939.
- [5] 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. March, pp. 68–74, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.04.014.
- [6] M. Sholichuddin and Subowo, "Perbedaan sifat mekanik hasil penyambungan las gtaw pada aluminium 6061 dengan filler ER4043 dan ER5356," *J. Tek. Mesin*, pp. 1–8, 2014, Accessed: Oct. 04, 2024. [Online]. Available: <http://digilib.its.ac.id/public/its-paper-38740-2109030088-Paper.pdf>.
- [7] V. J. B. Jaykumar Vora, *Advances in welding technologies for process development*, 1st Ed, Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2019. doi: 10.1201/9781351234825.
- [8] A. Sentana, D. Lazuardi, M. J. Maulidio, and M. R. Hermawan, "Kaji eksperimen manik las hasil proses pengelasan tungsten inert gas (TIG) menggunakan kawat las ER5356 untuk manufaktur aditif," *Teknobiz J. Ilm. Progr. Stud. Magister Tek. Mesin*, vol. 13, no. 3, pp. 195–200, Nov. 2023, doi: 10.35814/teknobiz.v13i3.5835.
- [9] C. Xia *et al.*, "A review on wire arc additive manufacturing: monitoring, control

- and a framework of automated system,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 57, pp. 31–45, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.08.008..
- [10] A. R. McAndrew *et al.*, “Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire arc additively manufactured features for microstructural refinement,” *Addit. Manuf.*, vol. 21, no. March, pp. 340–349, May 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.03.006.
- [11] J.-H. Lee, C.-M. Lee, and D.-H. Kim, “Repair of damaged parts using wire arc additive manufacturing in machine tools,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 16, pp. 13–24, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.11.156.
- [12] D.-G. Ahn, “Direct metal additive manufacturing processes and their sustainable applications for green technology: a review,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Technol.*, vol. 3, no. 4, pp. 381–395, 2016, doi: 10.1007/s40684-016-0048-9.
- [13] G. A. Widiyantara, I. N. Pasek Nugraha, and K. R. Dantes, “Analisis kekerasan hasil pengelasan gas tungsten arc welding pada baja ST 37 dengan variasi media pendingin,” *Quantum Tek. J. Tek. Mesin Terap.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–4, Oct. 2021, doi: 10.18196/jqt.v3i1.12245.
- [14] S. Widharto, “*Petunjuk kerja las*,” vol 6, Jakarta: Pradnya Paramita, 2006.
- [15] A. Rahmatika, S. Ibrahim, M. Hersaputri, and E. Aprilia, “Studi pengaruh variasi kuat arus terhadap sifat mekanik hasil pengelasan GTAW alumunium 1050 dengan filler ER4043,” *J. Polimesin*, vol. 17, no. 1, pp. 47–54, 2019, doi: <https://doi.org/10.30811/jpl.v17i1.731>.
- [16] M. Liberini *et al.*, “Selection of optimal process parameters for wire arc additive manufacturing,” *Procedia CIRP*, vol. 62, pp. 470–474, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2016.06.124.
- [17] P. Gokhale Nitish, P. Kala, and V. Sharma, “Experimental investigations of TIG welding based additive manufacturing process for improved geometrical and mechanical properties,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1240, no. 1, p. 012045, Jul. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1240/1/012045.
- [18] E. Gunawan *et al.*, “Analysis of the effect of current flow variations in GTAW on SS 400 plate material connected with SUS 304 stainless steel plate against tensile strength and hardness with ER308L electrodes,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1175, no. 1, p. 012277, Mar. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1175/1/012277.
- [19] Sutarno, Warso, and Mastur, “Pengaruh perbedaan kampuh pada las tungsten inert

- gas terhadap sifat mekanis kuningan ( Cu Zn ),” *Intuisi Tek. dan Seni*, vol. 14, no. 1, pp. 37–46, 2022, Accessed: Oct. 18, 2023 [Online]. Available: <https://ejournal.stt-wiworotomo.ac.id/index.php/iteks/article/view/328>.
- [20] D. Dadang, “*Teknik las GTAW*. ” Malang: Kementerian Pendidikan & Kebudayaan, 2013. Accessed: Dec. 11, 2024 [Online]. Available: <https://repositori.kemdikbud.go.id/9528/1/teknik-las-gtaw-xi-1.pdf>.
- [21] D. Prakoso, A. Mufarrih, and I. Setyowidodo, “Investigasi pengaruh kuat arus terhadap kekuatan tarik material ST42 pada pengelasan GTAW menggunakan kampuh v,” *Univ. Nusantara PGRI Kediri*, vol. 2, no. 1, pp. 199–204, 2018, doi: <https://doi.org/10.29407/inotek.v2i1.483>.
- [22] R. Siswanto, “*Teknologi pengelasan*,” Teknik. Mesin Universitas Lambung Mangkurat, 2018.
- [23] A. Achmadi, “Studi eksperimen pengaruh kuat arus terhadap kekuatan tarik dan kekerasan hasil lasan logam pipa aluminium seri 5000”, *Simetris*, vol. 9, no.2,p.6,2015, Accessed: Sep. 10, 2024 [Online]. Available: <https://www.sttrcepu.ac.id/jurnal/index.php/simetris/article/view/110/69>.
- [24] E. Budiyanto, E. Nugroho, and A. Masruri, “Pengaruh diameter filler dan arus pada pengelasan tig terhadap kekuatan tarik dan struktur mikro pada baja karbon rendah,” *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 6, no. 1, pp. 54–61, Oct. 2017, doi: [10.24127/trb.v6i1.467](https://doi.org/10.24127/trb.v6i1.467).
- [25] A. Naufal, S. Jokosisworo, and Samuel, “Pengaruh kuat arus listrik dan sudut kampuh v terhadap kekuatan tarik dan tekuk aluminium 5083 pengelasan GTAW,” *J. Tek. Perkapalan*, vol. 4, no. 1, pp. 256–264, 2016, Accessed: Jan. 09, 2024[Online].Available:<https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval/article/view/13635>.
- [26] P. Alloys, “ER4043 data sheet,” no. 713, pp. 0–1, 2008, Accessed: Oct. 07, 2023 [Online].Available:<http://www.pinnaclealloys.com/wp/wp-content/uploads/2015/11/er4043-11.16.pdf>.
- [27] Y. Tri, J. Wibowo, and S. Yudi Baskoro, “*Panduan metalografi*,” 1st ed. Jakarta: LP2M Politeknik manufaktur astra, 2020. Accessed: Jan. 03, 2025 [Online]. Available:<https://repository.polytechnic.astra.ac.id/files/original/0fc5fc6144704d42442012e7e169fdf5573da7cb.pdf>.

- [28] H. Wiryosumarto and T. Okumura, “*Teknologi pengelasan logam*,” 8th ed. PT Pradnya Paramita. Jakarta, 2000.
- [29] H. McArthur and D. Spalding, “Mechanical properties and testing,” in *Engineering Materials Science*, Oxford, U.K: Elsevier, 2004, pp. 100–128. doi: 10.1533/9781782420491.100.
- [30] D. Tabor, “The deformation of metals by sperical indenters: ideal plastic metals,” in *The Hardness of Metals*, London: Oxford University Press, 1951, pp. 44–66. doi: 10.1093/oso/9780198507765.003.0004.
- [31] M. El-Sherbiny, R. Hegazy, M. Ibrahim, and A. Abuelezz, “The influence of geometrical tolerances of vickers indenter on the accuracy of measured hardness,” *Int. J. Metrol. Qual. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–6, Sep. 2012, doi: 10.1051/ijmqe/2012009.
- [32] Google, “Balai besar standardisasi dan pelayanan jasa industri bahan dan barang teknik.” Accessed: Jul. 03, 2024 [Online]. Available: [https://www.google.com/maps/place/Balai+Besar+Standardisasi+dan+Pelayanan+Jasa+Industri+Bahan+dan+Barang+Teknik/@6.8827383,107.6076829,17z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1s0x2e68e6f7565af0d7:0xb84a0626e2576990!8m2!3d-6.8827436!4d107.6102578!16s%2Fg%2F1hf3j9\\_6](https://www.google.com/maps/place/Balai+Besar+Standardisasi+dan+Pelayanan+Jasa+Industri+Bahan+dan+Barang+Teknik/@6.8827383,107.6076829,17z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1s0x2e68e6f7565af0d7:0xb84a0626e2576990!8m2!3d-6.8827436!4d107.6102578!16s%2Fg%2F1hf3j9_6).
- [33] 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, pp. 37–44, Mar. 2019, doi: 10.20961/nozel.v1i1.28484.