

The Effect of Current Strength and Tungsten Inert Gas (TIG) Welding Cooling Media on Aluminum 6063 on Hardness and Macro Structure **[Pengaruh Kuat Arus dan Media Pendingin Pengelasan Tungsten Inert Gas (TIG) pada Aluminium 6063 Terhadap Kekerasan dan Struktur Makro]**

Arya Hardi Alvian¹⁾, Mulyadi²⁾

¹⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

*Email Penulis Korespondensi: mulyadi@umsida.ac.id

Abstract. *Aluminum welding is an important process in the modern manufacturing industry due to its widespread use in light construction and transportation. However, welding aluminum faces challenges due to its reactivity to oxygen, which can produce oxides that compromise the quality of the joint. This research focuses on the Tungsten Inert Gas (TIG) welding technique for Aluminum 6063, with the aim of finding the relationship between process parameters and material characteristics, especially hardness and macro structure in the weld zone. The research method involves welding with varying current strength and coolant, followed by Brinell hardness (HB) testing and macrostructural analysis. The results show that the specimen with a current strength parameter of 120A and oil cooling produces an average hardness of 228 HB, while the specimen with 130A and water cooling shows the lowest value of 151.3 HB. Macrostructural analysis revealed changes in the Weld Metal and Heat Affected Zone (HAZ), as well as the presence of weld defects in specimens with a current strength of 130 A. This research provides important insights for optimizing the aluminum welding process.*

Keywords - *Welding, Tungsten Inert Gas (TIG), Aluminum 6063, Hardness, Macrostructure.*

Abstrak. *Pengelasan aluminium adalah proses penting dalam industri manufaktur modern karena penggunaannya yang luas dalam konstruksi ringan dan transportasi. Namun, pengelasan aluminium menghadapi tantangan karena reaktivitasnya terhadap oksigen, yang dapat menghasilkan oksida yang mengganggu kualitas sambungan. Penelitian ini fokus pada teknik pengelasan Tungsten Inert Gas (TIG) untuk Aluminium 6063, dengan tujuan menemukan hubungan antara parameter proses dan karakteristik material, khususnya kekerasan dan struktur makro pada zona las. Metode penelitian melibatkan pengelasan dengan variasi kuat arus dan pendingin, diikuti dengan pengujian kekerasan Brinell (HB) dan analisis makrostruktur. Hasil menunjukkan bahwa spesimen dengan parameter kuat arus 120A dan pendingin oli menghasilkan kekerasan rata-rata 228 HB, sedangkan spesimen dengan 130A dan pendingin air menunjukkan nilai terendah 151,3 HB. Analisis makrostruktur mengungkapkan perubahan pada Weld Metal dan Heat Affected Zone (HAZ), serta adanya cacat las pada spesimen dengan kuat arus 130 A. Penelitian ini memberikan wawasan penting untuk pengoptimalan proses pengelasan aluminium.*

Kata Kunci – *Pengelasan, Tungsten Inert Gas (TIG), Aluminium 6063, Kekerasan, Makrostruktur.*

I. PENDAHULUAN

Pengelasan aluminium merupakan proses kritis dalam industri manufaktur modern karena aluminium adalah material yang sering digunakan dalam konstruksi ringan, transportasi, dan industri lainnya [1]. Namun, pengelasan aluminium tidak selalu mudah dilakukan karena sifatnya yang reaktif terhadap oksigen, yang dapat menyebabkan terbentuknya oksida yang mengganggu kualitas pengelasan. Oleh karena itu, penting untuk mempelajari dan mengoptimalkan parameter proses pengelasan untuk meningkatkan kualitas sambungan dan meminimalkan cacat [2].

Salah satu teknik pengelasan yang umum digunakan adalah Las tipe GTAW atau yang biasa disebut (TIG) *Tungsten Inert Gas* adalah pengelasan dengan memakai busur nyala dengan tungsten/elektroda yang terbuat dari wolfram, sedangkan bahan penambahnya digunakan bahan yang sama atau sejenis dengan material induknya [3]. Untuk mencegah oksidasi, dipakai gas kekal (inert) 99 % Argon (Ar) murni.[4] Dalam konteks aluminium, pemilihan parameter proses TIG seperti arus pengelasan, kecepatan pengelasan, jenis elektroda, dan fluks yang digunakan sangat mempengaruhi karakteristik mekanis dari sambungan yang dihasilkan [5].

Studi mengenai pengaruh parameter proses *Tungsten Inert Gas* (TIG) terhadap kekerasan dan struktur makro aluminium penting untuk mengidentifikasi kondisi optimal pengelasan [6]. Kekerasan material merupakan indikator penting dari kekuatan mekanis sebuah sambungan pengelasan, sementara struktur makro memberikan wawasan tentang tata letak butir dan potensial adanya cacat seperti porositas dan retakan [7]. Dengan memahami hubungan antara parameter proses *Tungsten Inert Gas* (TIG) dan karakteristik mekanis serta makrostruktur aluminium, para

insinyur dan ahli material dapat mengembangkan metode pengelasan yang lebih efisien dan menghasilkan sambungan yang kuat dan tahan lama [8].

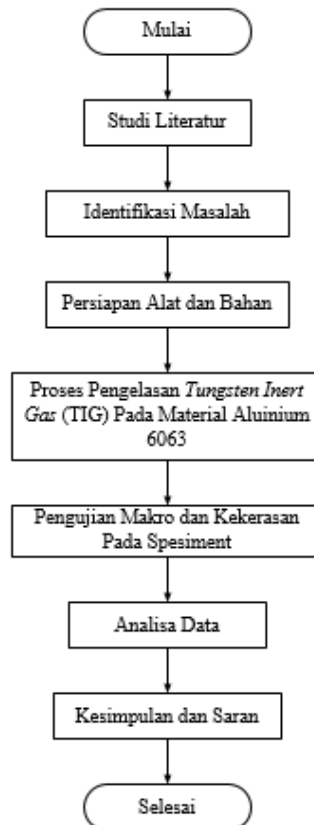
Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa variasi parameter proses seperti arus dan tegangan pengelasan dapat secara signifikan mempengaruhi pembentukan struktur makro aluminium [9]. Misalnya, penggunaan arus yang terlalu tinggi dapat meningkatkan resiko terbentuknya porositas, sementara kecepatan pengelasan yang terlalu lambat dapat menyebabkan pembentukan struktur dendritik yang kasar [10]. Oleh karena itu, optimisasi parameter proses TIG tidak hanya memperbaiki sifat mekanis sambungan, tetapi juga mengurangi kemungkinan cacat yang dapat mengurangi keandalan struktural keseluruhan [11].

Dalam konteks ini, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi berbagai kombinasi parameter proses *Tungsten Inert Gas* (TIG) untuk pengelasan aluminium, dengan fokus khusus pada pengaruhnya terhadap kekerasan dan struktur makro material. Melalui analisis mendalam terhadap hasil pengujian, diharapkan dapat ditemukan hubungan yang jelas antara parameter proses dengan karakteristik material yang dihasilkan dalam hal ini adalah kekerasan dan struktur makro pada zona las. Hasil dari studi ini dapat memberikan panduan berharga bagi praktisi industri dalam pengoptimalan proses pengelasan aluminium untuk mencapai sambungan yang lebih kuat dan efisien secara ekonomi.

II. METODE

A. Diagram Alir Penelitian

Metodologi yang digunakan pada proses menyusun serta proses urutan pada saat penelitian ini digambarkan dalam diagram alir (*flowchart*). Berikut ini merupakan diagram alir penelitian yang dapat dilihat pada **Gambar 1.** berikut:



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

B. Studi Literatur

Studi literatur ini dilakukan sebagai tahap awal dan juga sebagai landasan materi dengan mempelajari beberapa referensi dari jurnal, artikel, buku, tugas akhir yang berkaitan, pengamatan secara langsung di lapangan, juga dari media internet, dan diskusi dengan dosen pembimbing yang ada kaitannya dengan besar perencanaan tinjauan parameter pengelasan *Tungsten Inert Gas* (TIG) Terhadap kekerasan dan struktur makro [12].

C. Persiapan Alat dan Bahan

Persiapan alat dan bahan yang perlu dilakukan untuk melakukan pengelasan *Tungsten Inert Gas* (TIG) juga pengujian kekerasan dan pengujian mikro spesimen yaitu sebagai berikut.

1. Mesin Las TIG *STAHLWERK AC/DC WIG – 315P*

Mesin las TIG merk *STAHLWERK AC/DC WIG – 315P* pada penelitian ini digunakan untuk proses pengelasan dengan menyambungkan antar plat aluminium sehingga membentuk spesimen dengan menggunakan parameter yang telah ditentukan [13]. Parameter yang dirubah dari mesin las yaitu kuat arusnya yaitu 120 A,130 A,140 A. Untuk tekanan Gas Argon konstan dimasing-masing spesimenya yaitu 0.15 Mpa dengan flow rate 10-15 L/menit.



Gambar 2. Mesin Las *TIG STAHLWERK AC/DC WIG – 315P*

2. Mesin CNC Milling

Mesin CNC *milling* yang dipakai penelitian disini yaitu merk weidamc vmc-640 memiliki 3 axis yang berfungsi untuk melakukan pemotongan spesimen penggunaan mesin cnc milling harus memiliki program yang telah dibuat sebelumnya di aplikasi *Solidwork* [14].



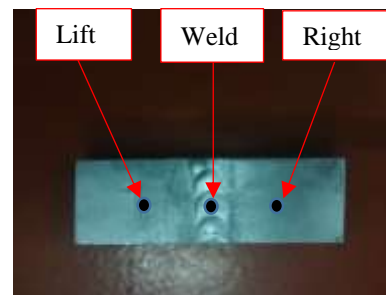
Gambar 3. Mesin CNC Milling

3. Alat Uji Kekerasan

Alat uji kekerasan ini digunakan untuk mengetahui kekerasan material pada hasil pengelasan dengan menggunakan parameter yang telah ditentukan.



a). Alat uji Kekerasan



b). Zone Uji Kekerasan

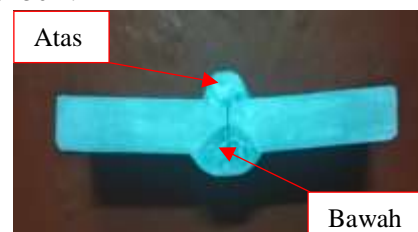
Gambar 4. Alat Uji Kekerasan

4. Alat Uji Makrostruktur

Alat uji makrostruktur menggunakan mikroskop optik untuk melihat struktur dari spesimen yang diuji dan untuk penelitian ini dilakukan dengan pembesaran 50 x.



a). Mikroskop Optik

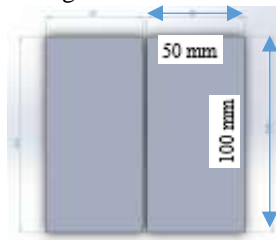


b). Zone Makrostruktur

Gambar 5. Pengujian Makrostruktur

5. Aluminium 6063

Plat aluminium 6063 adalah bahan spesimen yang digunakan dalam penelitian ini. Sesuai dengan banyaknya parameter proses pengelasan yaitu 9 spesimen dengan dimensi 100 mm x 50 mm x 5 mm.



a). potongan plat aluminium b). bentuk join pengelasan

Gambar 6. Plat Aluminium 6063

6. Kertas Gosok

Kertas gosok disini digunakan pada proses poles dan grinding. Padapenelitianini digunakan kertas gosok ukuran 1000, 2000, 3000 dan 5000.

7. Cairan *Etching*

Cairan kimia untuk etsa digunakan untuk mengikis permukaan supaya struktur makro dapat dilihat. Komposisi cairan yang digunakan disebut komposisi keller's yaitu 2 ml hf, 3 ml hcl, 5 ml hno₃, dan 190 ml h₂o [15].

a) **Proses Pengelasan *Tungsten Inert Gas* (TIG) pada Aluminium 6063**

Spesimen Aluminium 6063 akan dilas dengan posisi 1G dengan beberapa parameter yang akan menjadi acuan variasi yaitu variasi kuat arus pengelasan dan variasi pendinginan setelah pengelasan.

Tabel 1. Variasi Parameter Proses Pengelasan

No. Spc	Kuat Arus (A)	Pendingin	Kekerasan Brinell hardness (HB)	Struktur Mikro
1	120	air		
2	120	udara		
3	120	olie		
4	130	air		
5	130	udara		
6	130	olie		
7	140	air		
8	140	udara		
9	140	olie		

Pada penelitian ini proses Pengelasan *Tungsten Inert Gas* (TIG) dilakukan sebanyak 9 kali dengan perbedaan parameter yang telah ditentukan. Berikut adalah langkah –langkah proses Pengelasan *Tungsten Inert Gas* (TIG) :

1. Siapkan mesin las, elektroda, meja untuk pengelasan dan plat aluminium yang akan digunakan.
2. Jig atau klem plat aluminium yang telah disiapkan untuk mencegah terjadinya proses pemuaiian pada plat.
3. Atur Parameter mesin las TIG sesuai dengan parameter yang telah ditentukan.
4. Lakukan proses pengelasan pada plat aluminium sebanyak 9 kali.
5. Pada setiap hasil pengelasan lakukan pendinginan pada hasil pengelasan sesuai dengan parameter pendingin yang ditentukan.
6. Kemudian lakukan pembersihan pada hasil pengelasan di area pengelasan dan memberikan nomer specimen sesuai dengan nomer parameter.
7. Apabila semua proses pengelasan sudah selesai lakukan pembersihan lingkungan sekitar pengelasan dan pembersihan pada alat dan bahan pengelasan.



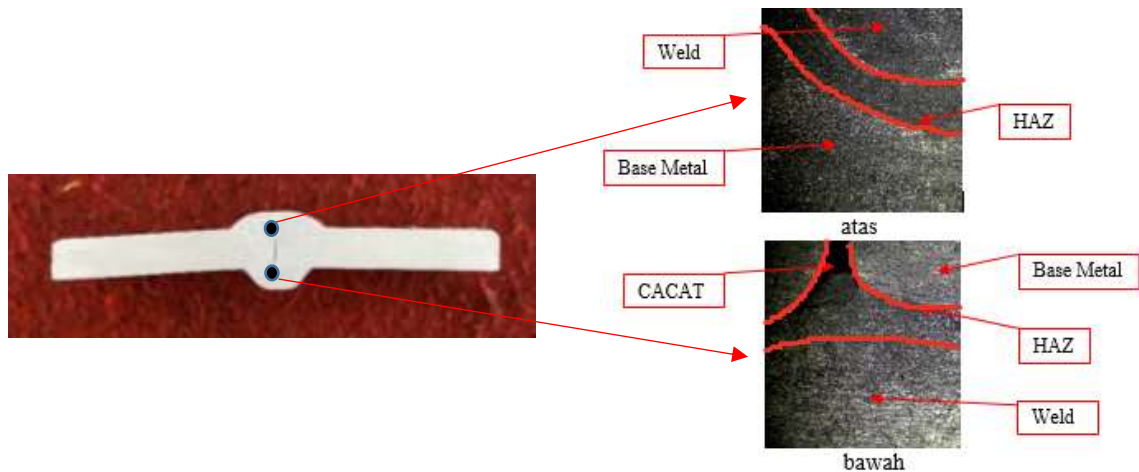
Gambar 7. Hasil Pengelasan *Tungsten Inert Gas* (TIG)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Uji Makrostruktur

Pengujian Mikrostruktur dilakukan dengan alat Mikroskop Optik menggunakan mikroskop 50 x. Berikut hasil dari pengambilan makrostruktur pengelasan *Tungsten Inert Gas* (TIG) aluminium 6063 dengan uji makrostruktur. Berikut dibawah ini adalah hasil uji makrostruktur dari proses *friction stir welding* dengan metode OA Taguchi.

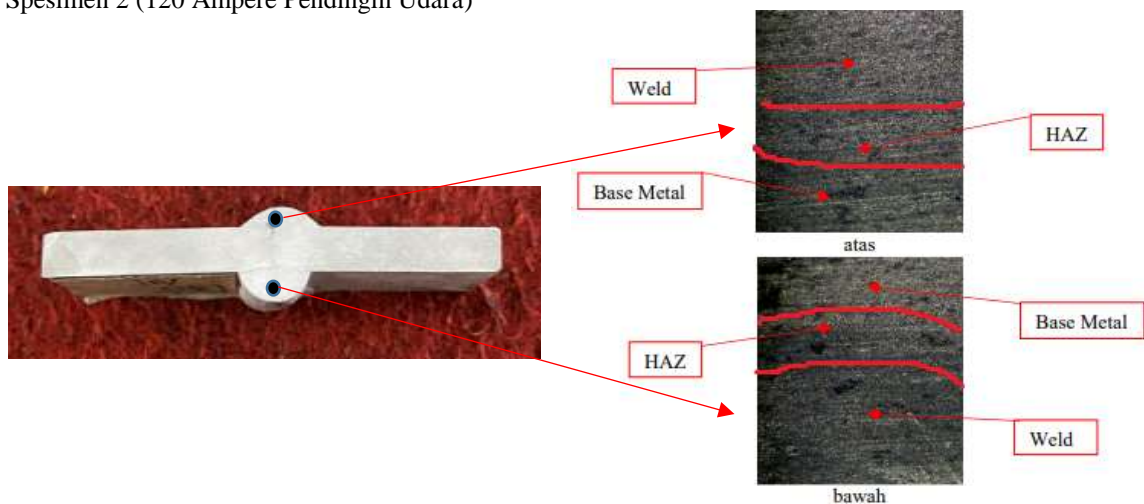
1. Spesimen 1 (120 Ampere Pendingin Air)



Gambar 8. Makrostruktur Spesimen 1

Sesuai dengan **Gambar 8**. Berdasarkan parameter 120 Ampere dan pendingin air, dimana terdapat Base Metal, Weld metal dan HAZ (*Heat Affected Zone*) pada spesimen pengelasan atas dan terdapat Base Metal, Weld metal, HAZ dan cacat retakan pada spesimen pada spesimen pengelasan atas dan terdapat Base Metal, Weld metal yang membesar, HAZ yang mengecil dengan cacat retakan pengelasan pada spesimen pengelasan.

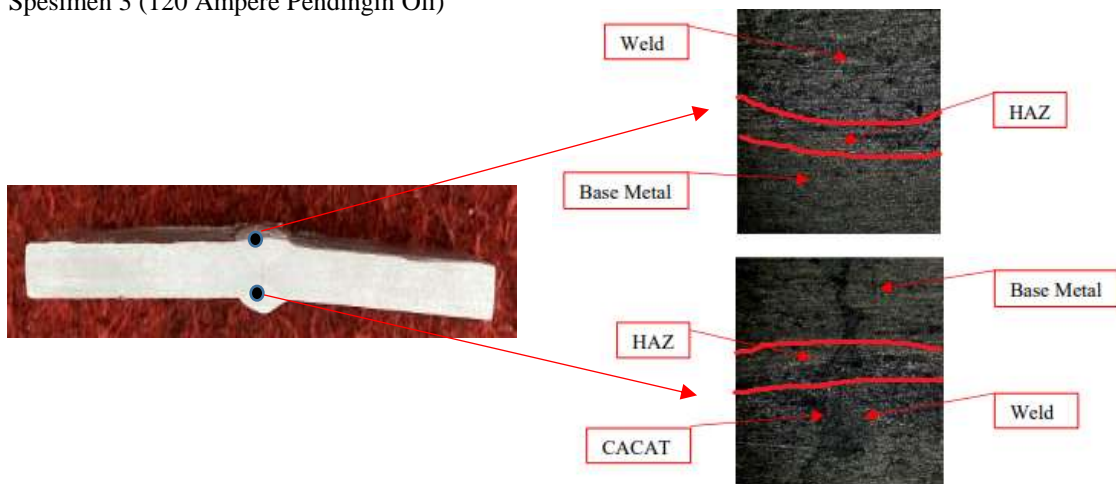
2. Spesimen 2 (120 Ampere Pendingin Udara)



Gambar 9. Makrostruktur Spesimen 2

Sesuai dengan **Gambar 9**. Berdasarkan parameter 120 Ampere dan pendingin udara, dimana terdapat Base Metal, Weld metal dan HAZ (*Heat Affected Zone*) pada spesimen pengelasan atas dan terdapat Base Metal, Weld metal yang membesar, HAZ yang mengecil dengan cacat retakan pengelasan pada spesimen pengelasan.

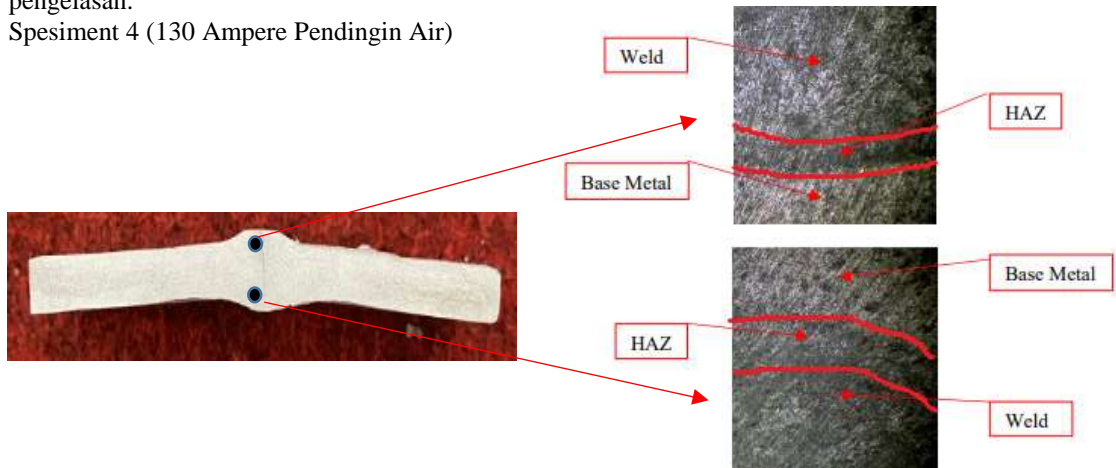
3. Spesimen 3 (120 Ampere Pendingin Oli)



Gambar 10. Makrostruktur Spesimen 3

Sesuai dengan **Gambar 10**. Berdasarkan parameter 120 Ampere dan pendingin oli, dimana terdapat Base Metal, Weld metal dan HAZ (*Heat Affected Zone*) pada spesimen pengelasan atas dan terdapat Base Metal, Weld metal yang membesar, HAZ yang mengecil dengan cacat retakan pengelasan pada spesimen pengelasan.

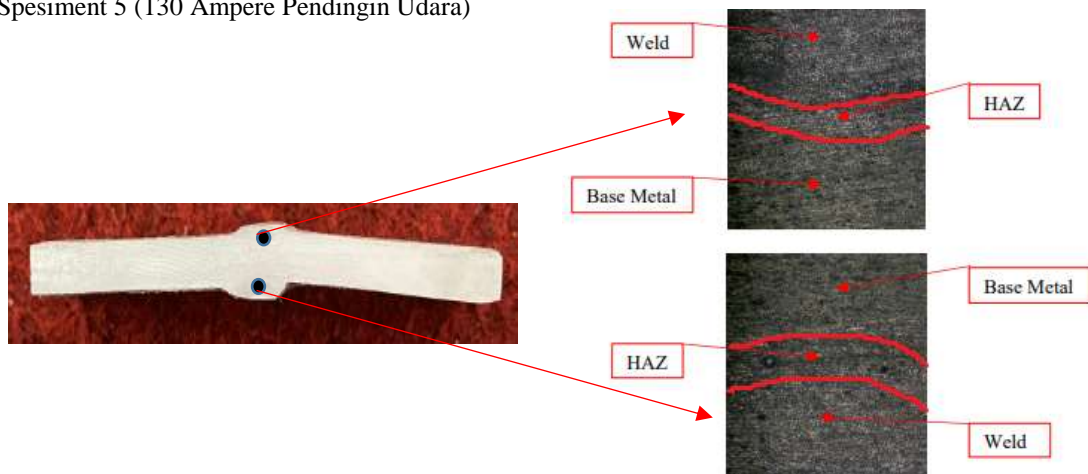
4. Spesimen 4 (130 Ampere Pendingin Air)



Gambar 11. Makrostruktur Spesimen 4

Sesuai dengan **Gambar 11**. Berdasarkan parameter 130 Ampere dan pendingin air, dimana terdapat Base Metal, Weld metal dan HAZ (*Heat Affected Zone*) pada spesimen pengelasan atas dan terdapat Base Metal, Weld metal yang mengecil, HAZ yang melebar tanpa cacat pengelasan pada spesimen pengelasan.

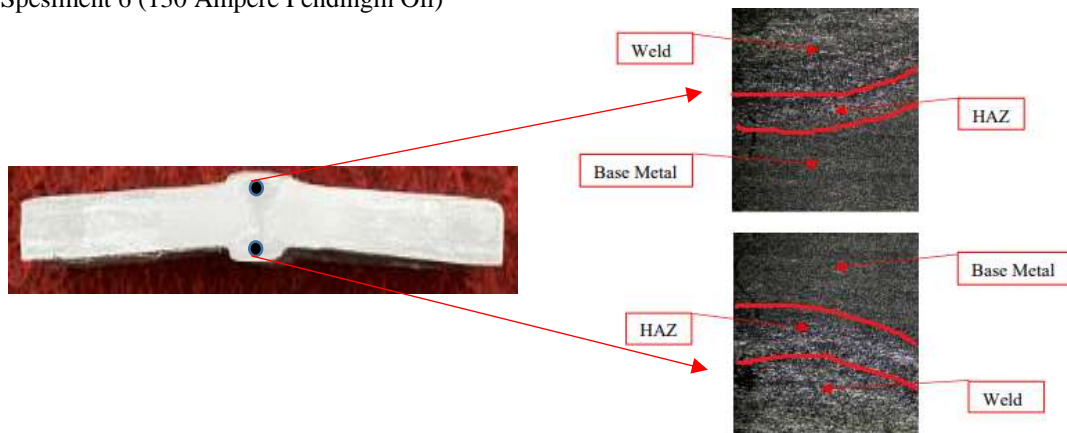
5. Spesimen 5 (130 Ampere Pendingin Udara)



Gambar 12. Makrostruktur Spesimen 5

Sesuai dengan **Gambar 12**. Berdasarkan parameter 130 Ampere dan pendingin udara, dimana terdapat Base Metal, Weld metal dan HAZ (*Heat Affected Zone*) pada spesimen pengelasan atas dan terdapat Base Metal, Weld metal yang mengecil, HAZ yang melebar tanpa cacat pengelasan pada spesimen pengelasan.

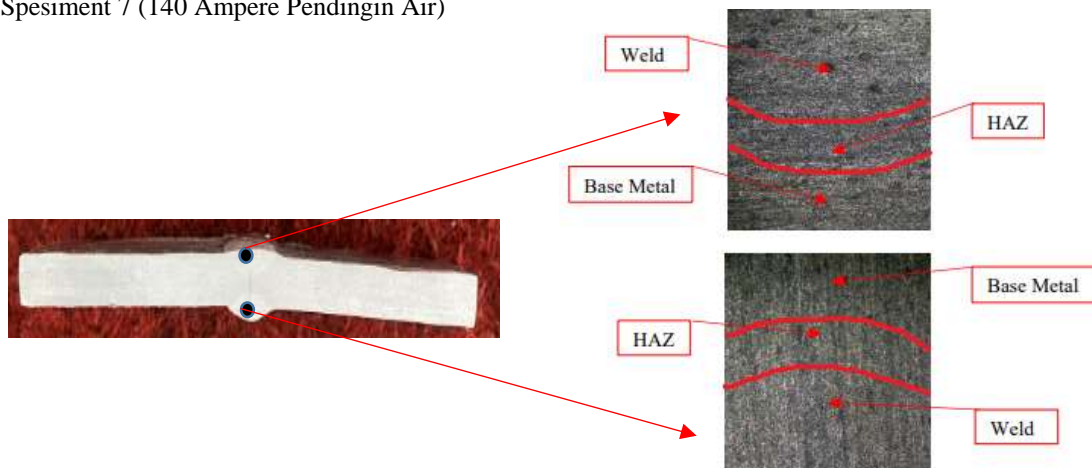
6. Spesiment 6 (130 Ampere Pendingin Oli)



Gambar 13. Makrostruktur Spesimen 6

Sesuai dengan **Gambar 13**. Berdasarkan parameter 130 Ampere dan pendingin oli, dimana terdapat Base Metal, Weld metal dan HAZ (*Heat Affected Zone*) pada spesimen pengelasan atas dan terdapat Base Metal, Weld metal yang mengecil, HAZ yang melebar tanpa cacat pengelasan pada spesimen pengelasan.

7. Spesiment 7 (140 Ampere Pendingin Air)



Gambar 14. Makrostruktur Spesimen 7

Sesuai dengan **Gambar 14**. Berdasarkan parameter 140 Ampere dan pendingin air, dimana terdapat Base Metal, Weld metal dan HAZ (*Heat Affected Zone*) pada spesimen pengelasan atas dan terdapat Base Metal, Weld metal yang mengecil, HAZ yang melebar tanpa cacat pengelasan pada spesimen pengelasan.

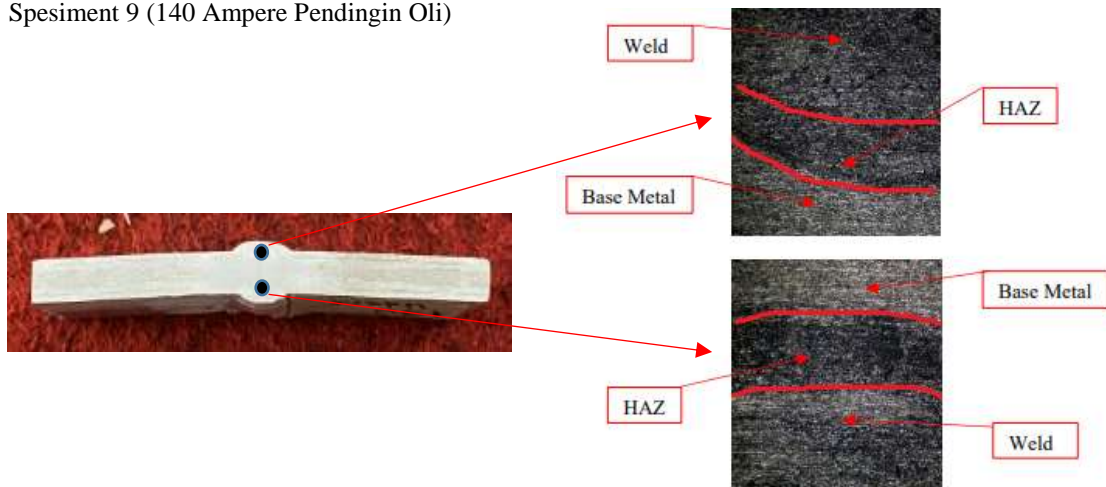
8. Spesiment 8 (140 Ampere Pendingin Udara)



Gambar 15. Makrostruktur Spesimen 8

Sesuai dengan **Gambar 15**. Berdasarkan parameter 140 Ampere dan pendingin udara, dimana terdapat Base Metal, Weld metal dan HAZ (*Heat Affected Zone*) pada spesimen pengelasan atas dan terdapat Base Metal, Weld metal yang mengecil, HAZ yang melebar tanpa cacat pengelasan pada spesimen pengelasan.

9. Spesiment 9 (140 Ampere Pendingin Oli)



Gambar 16. Makrostruktur Spesimen 9

Sesuai dengan **Gambar 16**. Berdasarkan parameter 140 Ampere dan pendingin oli, dimana terdapat Base Metal, Weld metal dan HAZ (*Heat Affected Zone*) pada spesimen pengelasan atas dan terdapat Base Metal, Weld metal yang mengecil, HAZ yang melebar tanpa cacat pengelasan pada spesimen pengelasan.

B. Uji Kekerasan

Uji ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kekerasan pengelasan *Tungsten Inert Gas* (TIG) aluminium 6063 menggunakan unit pengukuran kekerasan Brinell.

Tabel 2. Hasil Pengujian Kekerasan Brinell Hardness (HB)

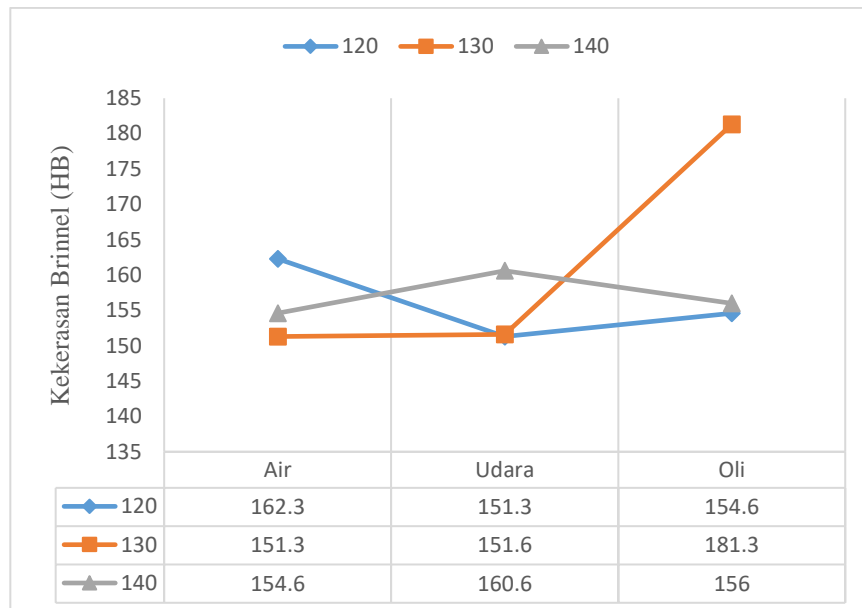
No. Spc	Kuat Arus (A)	Pendingin	Kekerasan Brinell Hardness (HB)			
			Lift	Weld	Right	Rata-rata
1	120	air	154	179	154	162.3
2	120	udara	148	161	148	152.3
3	120	olie	212	260	212	228
4	130	air	138	178	138	151.3
5	130	udara	138	179	138	151.6
6	130	olie	187	170	187	181.3
7	140	air	154	156	154	154.6
8	140	udara	156	170	156	160.6
9	140	olie	156	156	156	156

Sesuai data pada **Tabel 2**, hasil pengujian kekerasan brinell dapat disimpulkan bahwa dari 9 spesimen dengan parameter proses yang di uji diperoleh nilai tertinggi pada spesimen 3 dengan parameter kuat arus 120A menggunakan pendingin Oli memperoleh hasil kekerasan dengan rata-rata 228 HB karena oli memiliki titik didih tinggi yaitu 400°C dan massa jenis yang rendah sehingga proses pendinginannya lama untuk proses pendinginan oli menjadi media pendingin yang sangat baik sehingga partikel pada pengelasan menjadi lebih erat dan keras.

Nilai terendah ada pada spesimen 4 dengan parameter kuat arus 130A menggunakan pendingin Air memperoleh hasil kekerasan dengan rata-rata 151,3 HB karena nilai titik didih air 100°C dan massa jenis air yang tinggi maka proses pendinginan menjadi cepat maka partikel pada pengelasan cenderung lebih renggang dan kekerasan menjadi rendah.

C. Analisa dan Pembahasan Hasil Uji Kekerasan Brinell (HB) dan Uji Makrostruktur

Untuk memudahkan pemahaman pada data dari hasil uji mikro struktur dan uji kekerasan dilakukan proses analisa pada hasil pengelasan *Tungsten Inert Gas* (TIG). Tujuan analisa ini guna visualisasi yang lebih baik dan lebih mudah dimengerti.



Gambar 17. Grafik Hasil Uji Kekerasan Brinell Hardnes (HB) dan Makrostruktur

Berdasarkan pada **Gambar 17.** Grafik hasil pengujian kekerasan brinell (HB) dan uji mikrostruktur dari 9 spesimen dengan parameter proses yang di uji diperoleh nilai tertinggi pada spesimen 3 dengan parameter kuat arus 120A menggunakan pendingin Oli memperoleh hasil kekerasan dengan rata-rata 228 HB pada uji kekerasan dan pada uji mikrostruktur dimana terdapat Base Metal, Weld metal yang melebar dan HAZ (*Heat Affected Zone*) yang mengecil juga cacat retakan pada spesimen pengelasan karena kuat arus yang kurang tepat ,serta nilai terendah ada pada spesimen 4 dengan parameter kuat arus 130A menggunakan pendingin Air memperoleh hasil kekerasan dengan rata-rata 151,3 HB pada uji mikrostruktur dimana terdapat Weld metal yang mengecil dan HAZ (*Heat Affected Zone*) yang melebar tanpa cacat las karena ampere yang tepat pada pengelasan.

IV. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisa dari “Pengaruh Kuat Arus dan Media Pendingin Pengelasan Tungsten Inert Gas (TIG) Terhadap Kekerasan dan Struktur Makro” dengan Pengujian analisa makrostruktur dan kekerasan brinell maka dapat di ambil kesimpulan yaitu hasil pengujian kekerasan brinell (HB) dan uji makrostruktur dapat disimpulkan bahwa dari 9 spesimen dengan parameter proses yang di uji diperoleh nilai tertinggi pada spesimen 3 dengan parameter kuat arus 120A menggunakan pendingin Oli memperoleh hasil kekerasan dengan rata-rata 228 HB pada uji kekerasan dan pada uji makrostruktur dimana terdapat Base Metal, Weld metal yang melebar dan HAZ (*Heat Affected Zone*) yang mengecil juga cacat retakan pada spesimen pengelasan karena kuat arus yang kurang tepat ,serta nilai terendah ada pada spesimen 4 dengan parameter kuat arus 130A menggunakan pendingin Air memperoleh hasil kekerasan dengan rata-rata 151,3 HB pada uji makrostruktur dimana terdapat Weld metal yang mengecil dan HAZ (*Heat Affected Zone*) yang melebar tanpa cacat las karena kuat arus 130 ampere yang tepat untuk pengelasan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih saya ucapkan kepada Progam Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo yang telah memberikan ilmu dan wawasan yang bermanfaat serta rekan aslab, himpunan mahasiswa dan teman-teman yang telah membantu untuk menyelesaikan penelitian ini.

REFERENSI

- [1] R. T. Arrohman, "Analisa Kuat Arus Pada Pengelasan GMAW Sambungan Alumunium 6063 dengan Kampuh V Tunggal Terhadap Kekuatan Tarik Kekerasan Struktur Mikro dan Unsur Bahan," M.S. thesis, Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2022.
- [2] Y. Qohar, "Analisa Variasi Jenis Kampuh pada Pengelasan GMAW dengan Tipe Sambungan Butt Joint Alumunium 6063 Terhadap Kekuatan Tarik Kekerasan dan Struktur Mikro," M.S. thesis, Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2023.
- [3] S. Sulistyono and I. H. Shafly Kh., "Pengaruh Voltase dan Stick Out terhadap Cacat Permukaan Las MIG Butt

- Joint Aluminium 6063," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 19, no. 2, pp. 293-398, 2024.
- [4] R. W. Lubis et al., "Analisis Pengaruh Variasi Logam Pengisi (Filler) Pada Proses Pengelasan GTAW Paduan Aluminium Terhadap Uji Kekerasan Dan Struktur Mikro," *Sinergi Polmed: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 5, no. 2, pp. 42-51, 2024.
- [5] M. S. Pranata, A. W. B. Santosa, and M. Iqbal, "Perbandingan Kekuatan Tarik dan Kekuatan Kekerasan Las GMAW dan GTAW Terhadap Material Aluminium 6061 Dengan Variasi Arus Pengelasan," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 9, no. 1, pp. 59-69, 2020. [6] D. S. Pamuji *et al.*, "Efek Parameter Pengelasan terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Sambungan Aluminium AA6061 dengan Proses Friction Stir Welding," hal. 424-435.
- [7] A. Putra Pratama, "Pengaruh Variasi Waktu Tahan Pwht Hasil Pengelasan GMAW Al 6061-T6 Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro," M.S. thesis, Universitas Muhammadiyah Ponorogo, 2021.
- [8] W. Fsw, T. Sifat, M. Dan, M. Pada, dan A. Paduan, *Pengaruh Kecepatan Feedrate Friction Stir*, no. November 2021. 2024.
- [9] I. Helmi dan T. Tarmizi, "Pengaruh Bentuk Pin terhadap Sifat Mekanik Aluminium 5083 – H112 Hasil Proses Friction Stir Welding," *Jurnal Riset Teknologi Industri*, vol. 11, no. 1, hal. 43, 2017, doi: 10.26578/jrti.v11i1.2163.
- [10] Setiawan, A. (2016). Penelitian Stainless Steel 304 Terhadap Pengaruh Pengelasan Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) Untuk Variasi Arus 50 A, 100 A dan 160 A Dengan Uji Komposisi Kimia, Uji Struktur Mikro, Uji Kekerasan Dan Uji Impact (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta).
- [11] Soleh, M. Z. A., & Mulyadi, M. (2021). Design and Build JIG Design on Friction Stir Welding Using Fillet Connection on AA6061-T6 Material. *Indonesian Journal of Innovation Studies*, 14, 10-21070.
- [12] Wardana, A. I., & Mulyadi, M. Analysis of Underwater Friction Stir Welding (UFSW) Process Joint on AA6005-T6 Series Alumunium Alloy on Tensile Strength and Macro Structure: Analisa Sambungan Proses Underwater Friction Stir Welding (UFSW) pada Paduan Aluminium Seri AA6005-T6 terhadap Kuat Tarik dan Struktur Makro.
- [13] Subkhan, M. F., & Mulyadi, M. Confirmation Experiment of Friction Stir Welding Process on Aluminum Alloy Aa-6061-T6561 on Tensile Strength and Weld Penetration: Eksperimen Konfirmasi Proses Friction Stir Welding pada Material Alumunium Alloy Aa-6061-T6561 Terhadap Kekuatan Tarik dan Penetrasi Las.
- [14] M. A. I. Muslim and Iswanto, "Pengaruh Parameter Pengelasan Pada Friction Stir Welding Terhadap Sifat Mekanik Polimer Jenis Polyethylene," *Progr. Stud. Tek. Mesin, Univ. Muhammadiyah Sidoarjo*, pp. 1-9, 2023.
- [15] Mulyadi, R. Firdaus, and R. S. Untari, "Optimization of Friction Stir Welding Parameters for AA6061-T651 Aluminum Alloy: Defect Analysis and Process Improvement," *Acad. Open*, vol. 8, no. 1, pp. 1-13, 2023, doi: 10.21070/acopen.8.2023.6665.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.