

The Effect of Current Strength and Tungsten Inert Gas (TIG) Welding Cooling Media on Aluminum 6063 on Impact Strength and Macrostructure

[Pengaruh Kuat Arus dan Media Pendingin Pengelasan Tungsten Inert Gas (TIG) pada Aluminium 6063 Terhadap Kekuatan Impact dan Struktur Makro]

Alif Firentiaro Pratama Putra¹⁾, Mulyadi²⁾

^{1),2)}Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

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

Abstract. Aluminum welding is an essential process in modern manufacturing industry due to its wide application in light construction and transportation. However, aluminum welding is challenging due to its reactivity to oxygen, which can produce oxides that compromise the quality of the joint. This study 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 macrostructure in the weld zone. The research method involves welding with varying current strength and coolant, followed by Charpy Impact testing and macrostructure analysis. The results show that the specimen with 130A current strength and water coolant parameters showed the highest value with an impact strength of 0.615 Joule/mm², while the specimen with 140A and water coolant showed the lowest value of 0.014 Joule/mm². Macrostructural analysis revealed that there were 5 welding defects, namely porosity defect 1 or small holes in the weld metal, 2 slag induction welding defects, defects at the termination of welding and 2 overlap welding defects in the weld metal zone in the base metal zone in specimen 4 and in specimen 7 there were 2 welding defects, namely slag induction welding defects, defects at the termination of welding and overlap welding defects in the weld metal zone in the base metal zone.

Keywords - Welding, Tungsten Inert Gas (TIG), Aluminum 6063, Impact, 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 Impact Charpy dan analisis makrostruktur. Hasil pengujian menunjukkan bahwa spesimen dengan parameter kuat arus 130A dan pendingin air menunjukkan nilai tertinggi dengan harga kekuatan impact sebesar 0,615 Joule/mm², sedangkan spesimen dengan 140A dan pendingin air menunjukkan nilai terendah 0,014 Joule/mm². Analisis makrostruktur mengungkapkan terdapat 5 cacat las yaitu cacat porositas 1 atau lubang kecil pada weld metal, 2 cacat las slag induction cacat pada berhentinya pengelasan dan 2 cacat pengelasan overlap pada zona weld metal pada zona base metal pada spesimen 4 dan pada spesimen 7 terdapat 2 cacat las yaitu cacat las slag induction cacat pada berhentinya pengelasan dan cacat pengelasan overlap pada zona weld metal pada zona base metal.

Kata Kunci – Pengelasan, Tungsten Inert Gas (TIG), Aluminium 6063, Impact, 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].

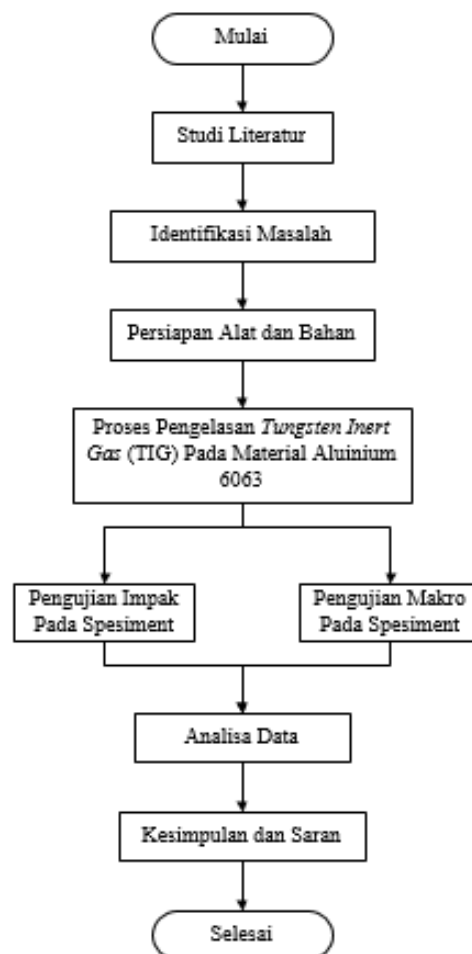
Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa variasi parameter proses seperti arus dan tegangan pengelasan dapat secara signifikan mempengaruhi pembentukan struktur makro aluminium [9]. Misalnya, penggunaan arus yang terlalu tinggi dapat meningkatkan resiko terbentuknya porositas, sementara kecepatan 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 uji impact 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 uji impact 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 uji impact 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 uji impact dan pengujian makro 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.

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].

3. Alat Uji Impact

Alat uji impact ini digunakan untuk mengetahui sifat ketangguhan suatu material baik dalam wujud liat maupun ulet serta getas. Dengan catatan bahwa apabila nilai atau harga impact semakin tinggi maka material tersebut memiliki keuletan yang tinggi. Dimana material uji dikatakan ulet jika patahan yang terjadi pada bidang patah tidak rata dan tampak berserat-serat [15]. Nilai impact dipengaruhi temperatur Karena temperatur dapat mempengaruhi material uji maka dalam melakukan pengujian, sebaiknya dilakukan pada suhu kamar. Alat yang digunakan adalah charpy test. Ada dua jenis batang uji standar yang digunakan, yaitu tarikan berbentuk V dan U. Dalam pengujian ini menggunakan tarikan berbentuk V. Bentuk material yang digunakan tarik berbentuk V karena dapat melokalisasi energi patahan.

Harga impact dapat dicari dengan persamaan :

$$E = W \cdot R (\cos \beta - \cos \alpha) \dots\dots\dots (1)$$

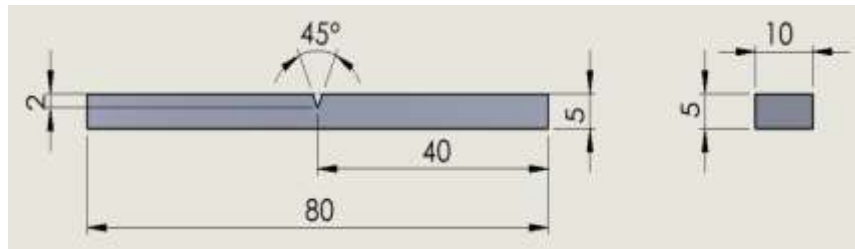
Dimana :

E = Energi Impact yang terserap (Joule)
W = Luas Penampang (mm²)
R = Radius (m)
 β = Sudut akhir (°)
 α = Sudut awal (°)

$$IS = \frac{E}{F} \dots\dots\dots (2)$$

Dimana :

IS = Nilai Impact (Joule/mm²)
E = Energi Impact yang terserap (Joule)
F = Luas Penampang (mm²)



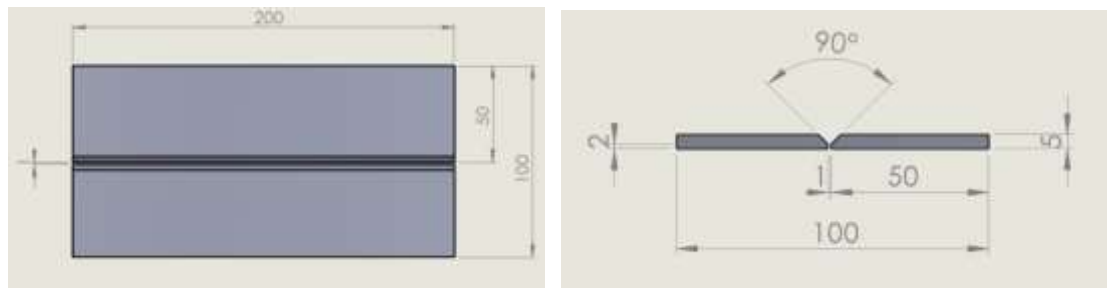
Gambar 2. Spesimen Uji Impact

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.

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). desain plat aluminium

b). desain bentuk join pengelasan

Gambar 3. Dimensi Spesimen Pengelasan

6. Kertas Gosok

Kertas gosok disini digunakan pada proses poles dan grinding. Pada penelitian ini 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].

D. 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	Impact Charpy	Struktur Makro
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 pemuaian 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 4. Proses Pengelasan TIG (*Tungsten Inert Gas*)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

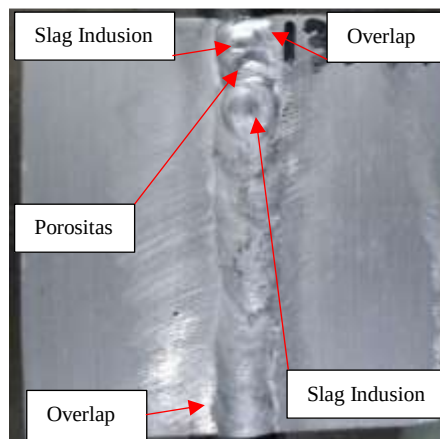
A. Uji Makro Struktur

Pengujian Mikrostruktur dilakukan pada 9 spesimen pengelasan TIG (*Tungsten Inert Gas*) dengan menggunakan variasi ampere dan variasi pendingin air, udara dan oli. Pengujian Mikrostruktur menggunakan alat Mikroskop Optik menggunakan mikroskop 50 x. Berikut dibawah ini merupakan hasil dari pengambilan makrostruktur pengelasan TIG (*Tungsten Inert Gas*) aluminium 6063.



Gambar 5. Hasil Pengelasan TIG (*Tungsten Inert Gas*)

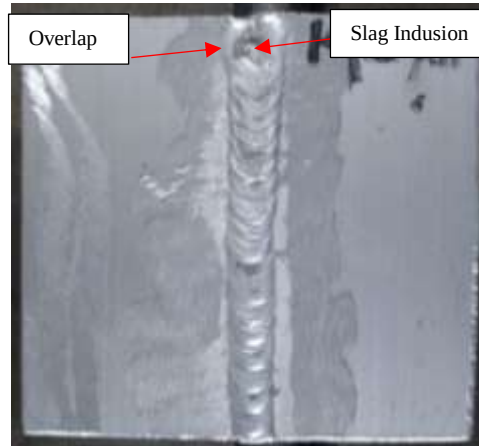
1. Spesiment 4 (130 Ampere Pendingin Air)



Gambar 6. Makrostruktur Spesimen 4

Sesuai dengan **Gambar 6**. Berdasarkan parameter 130 Ampere dan pendingin air, dimana terdapat 5 cacat las yaitu cacat porositas 1 atau lubang kecil pada weld metal, 2 cacat las slag indusion cacat pada berhentinya pengelasan dan 2 cacat pengelasan overlap pada zona *weld metal* pada zona *base metal*, cacat las ini terjadi karena ampere yang teralu rendah.

2. Spesiment 7 (140 Ampere Pendingin Air)



Gambar 7. Makrostruktur Spesimen 7

Sesuai dengan **Gambar 7**. Berdasarkan parameter 140 Ampere dan pendingin air, dimana terdapat 2 cacat las yaitu cacat las slag indusion cacat pada berhentinya pengelasan dan cacat pengelasan overlap pada zona *weld metal* pada zona *base metal*, cacat las ini terjadi karena ampere yang teralu tinggi.

B. Uji Impact

Pengujian spicemen uji Impak kali ini dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang. Uji ini bertujuan untuk mengetahui sifat ketangguhan suatu material baik dalam wujud liat maupun ulet serta getas. Dengan catatan bahwa apabila nilai atau harga impact semakin tinggi maka material tersebut memiliki keuletan yang tinggi. pengelasan *Tungsten Inert Gas* (TIG) aluminium 6063 menggunakan pengujian impact type Charpy.



Gambar 8. Pengujian Impact

Berikut yaitu langkah-langkah pengujian impact :

1. Pasang spesimen ke landasan dengan takik di tengah, bagian takik di bagian dalam, sehingga pendulum membentur benda uji di sisi berlawanan dari sisi takik benda kerja uji.
2. Bandul setinggi H atau membentuk sudut^o (α)
3. Ubah posisi jarum ke skala yang lebih rendah pada angka nol.
4. Tarik LockHandle sehingga bandul lepas memukul benda uji, kemudian bandul tetap berayun miring (β)
5. Tarik Brake Handle, tahan agar pendulum berhenti
6. Catatan sudut β yang tertunjuk pada indikator
7. Setelah dulakukan pengujian ambil benda kerja untuk diukur luasan dimensi patahannya, teliti penampang patahan benda kerja dan gambarkan diidentifikasi jenis patahannya

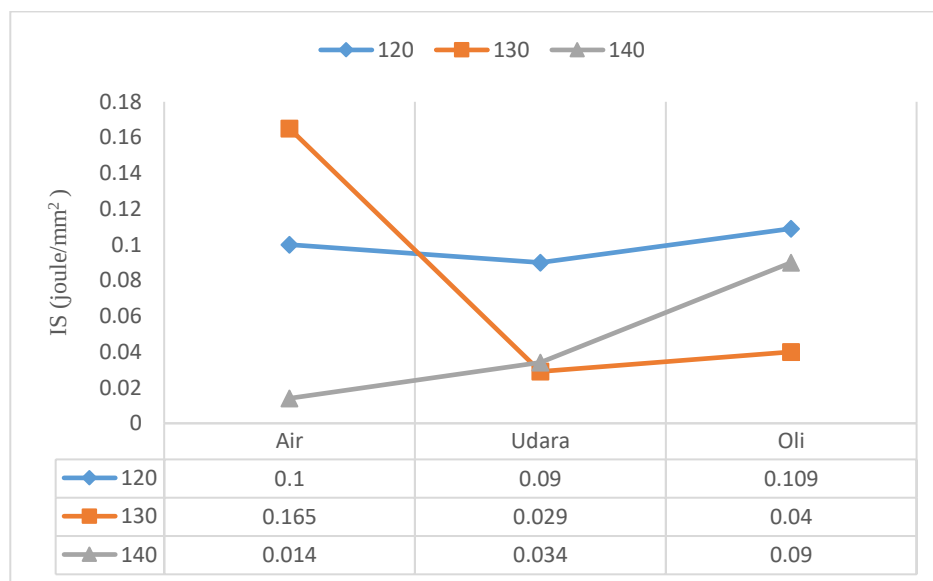
Tabel 2. Hasil Pengujian Impact dan Hasil Perhitungan Impact

No. Spc	Kuat Arus (A)	Pendingin	E (Joule)	IS (Joule/mm ²)
1	120	air	8.022	0.100
2	120	udara	7.463	0.093
3	120	olie	8.755	0.109
4	130	air	13.202	0.165
5	130	udara	2.286	0.029
6	130	olie	3.219	0.040
7	140	air	1.135	0.014
8	140	udara	2.743	0.034
9	140	olie	7.186	0.090

Sesuai data pada **Tabel 2**, hasil pengujian Impact dapat disimpulkan bahwa dari 9 spesimen dengan parameter proses yang di uji diperoleh nilai tertinggi pada spesimen 4 dengan parameter kuat arus 130A menggunakan pendingin Air memperoleh hasil harga kekuatan impact sebesar 0,615 Joule/mm² Nilai terendah ada pada spesimen 7 dengan parameter kuat arus 140A menggunakan pendingin Air memperoleh hasil harga kekuatan impact sebesar 0,014 Joule/mm².

C. Analisa dan Pembahasan Hasil Kekuatan Impact

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

**Gambar 9.** Grafik Hasil Kekuatan Impact

Berdasarkan pada **Gambar 9**, Grafik hasil pengujian kekuatan impact dari 9 spesimen dengan parameter proses diperoleh nilai tertinggi pada spesimen spesimen 4 dengan parameter kuat arus 130A menggunakan pendingin Air memperoleh hasil harga kekuatan impact sebesar 0,615 Joule/mm² karena dengan ampere pengelasan yang tepat dan pendingin yang tepat maka menjadikan pengelasan cenderung lebih baik sehingga mendapatkan hasil yang baik juga pada uji impact dan pada makrostrukturnya dimana terdapat 5 cacat las yaitu cacat porositas 1 atau lubang kecil pada weld metal, 2 cacat las slag indusion cacat pada berhentinya pengelasan dan 2 cacat pengelasan overlap pada zona *weld metal* pada zona *base metal*, cacat las ini terjadi karena ampere yang teralu rendah.

Serta nilai terendah ada pada spesimen 7 dengan parameter kuat arus 140A menggunakan pendingin Air memperoleh hasil harga kekuatan impact sebesar 0,014 Joule/mm² karena nilai titik didih air 100°C dan massa jenis air yang tinggi maka proses pendiginan menjadi cepat maka partikel pada pengelasan cenderung lebih renggang dan kekerasan menjadi rendah. pada uji makrostruktur dimana terdapat 2 cacat las yaitu cacat las slag indusion cacat pada berhentinya pengelasan dan cacat pengelasan overlap pada zona *weld metal* pada zona *base metal*, cacat las ini terjadi karena ampere yang teralu tinggi.

IV. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisa dari “Pengaruh Kuat Arus dan Media Pendingin Pengelasan Tungsten Inert Gas (TIG) pada Aluminium 6063 Terhadap Kekuatan Impact dan Struktur Makro” dengan Pengujian analisa kekuatan impact dan makrostruktur maka dapat di ambil kesimpulan yaitu hasil pengujian impact charpy dan uji makrostruktur dapat disimpulkan bahwa dari 9 spesimen dengan parameter proses yang di uji diperoleh nilai tertinggi pada spesimen spesimen 4 dengan parameter kuat arus 130A menggunakan pendingin Air memperoleh hasil harga kekauan impact sebesar 0,615 Joule/mm² karena dengan ampere pengelasan yang tepat dan pendingin yang tepat maka menjadikan pengelasan cenderung lebih baik sehingga mendapatkan hasil yang baik juga pada uji impact dan pada dimana terdapat 5 cacat las yaitu cacat porositas 1 atau lubang kecil pada weld metal, 2 cacat las slag indusion cacat pada berhentinya pengelasan dan 2 cacat pengelasan overlap pada zona *weld metal* pada zona *base metal*, cacat las ini terjadi karena ampere yang terlalu rendah. serta nilai terendah ada pada spesimen 7 dengan parameter kuat arus 140A menggunakan pendingin Air memperoleh hasil harga kekauan impact sebesar 0,014 Joule/mm² karena nilai titik didih air 100°C dan massa jenis air yang tinggi maka proses pendiginan menjadi cepat maka partikel pada pengelasan cenderung lebih renggang dan kekerasan menjadi rendah. pada uji makrostruktur dimana terdapat 2 cacat las yaitu cacat las slag indusion cacat pada berhentinya pengelasan dan cacat pengelasan overlap pada zona *weld metal* pada zona *base metal*, cacat las ini terjadi karena ampere yang terlalu tinggi.

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] Isworo, Ambar, Untung Budiarto, and Ari Wibawa Budi Santosa. "Analisa Perbandingan Kekuatan Impak, Tarik, Tekuk dan Mikrografi Pada Alumunium 6061 Pasca Pengelasan Tungsten Inert Gas (TIG) dengan Media Pendingin Air Laut dan Air Tawar." *Jurnal Teknik Perkapalan* 8.3 : 320-329. 2020.
- [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] Arifin, Reza Risqullah Putra Nur, and Yunus Yunus. "Pengaruh Media Pendingin Terhadap Kekuatan Impak Dan Struktur Mikro Hasil Pengelasan Aluminium 5083 Dengan Las TIG." *Jurnal Teknik Mesin* 9.02 : 31-36. 2021.
- [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] Saputra, Bagus, Xander Salahudi, and Catur Pramono. "Analisis Variasi Arus Pengelasan TIG (Tungsten Inert Gas) Terhadap Ketangguhan Impak Sambungan Butt Joint Pada Aluminium 5083." *SENASTER" Seminar Nasional Riset Teknologi Terapan"*. Vol. 3. No. 1. 2022.
- [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, doi: 10.26578/jrti.v11i1.2163. 2019.
- [10] Setiawan, A. 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). 2019.
- [11] Soleh, M. Z. A., & Mulyadi, M. Design and Build JIG Design on Friction Stir Welding Using Fillet Connection on AA6061-T6 Material. *Indonesian Journal of Innovation Studies*, 14, 10-21070. 2021.

- [12] Wardana, A. I., & Mulyadi, M. Analysis of Underwater Friction Stir Welding (UFSW) Process Joint on AA6005-T6 Series Aluminium 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 Aluminium 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, doi: 10.21070/acopen.8.2023.6665. 2023.

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.