

Analysis of the Effect of Current Variation on the Macrostructure of MIG (Metal Inert Gas) Welding Results on ASTM A36 Steel Plates **[Analisis Pengaruh Variasi Kuat Arus terhadap Struktur Makro Hasil Pengelasan MIG (Metal Inert Gas) pada Plat Baja ASTM A36]**

Nika Ade Anggi Pratama¹⁾, Mulyadi²⁾

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

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

Abstract. *In the development of technology and industry, steel is one of the important materials, as evidenced by its common use in the world of manufacturing, maritime, building materials, piping, oil and gas. Therefore, it is important to study and optimize the welding process parameters to improve the quality of the joints and minimize defects. This study aims to find various combinations of MIG (Metal Inert Gas) process parameters for steel welding with variations in current strength and coolant. The research method is to carry out the MIG (Metal Inert Gas) welding process and then conduct particle magnetic and macrostructure testing. The conclusion of the best particle magnetic test results (minimal defects) is specimen 5 with parameters of 100 Ampere and air cooling and the worst result is specimen 6 with parameters of 100 Ampere and oil cooling and the best macrostructure test results are specimen 8 with parameters of 120 Ampere and air cooling and the worst result is specimen 9 with parameters of 120 Ampere and oil cooling.*

Keywords - *Metal Inert Gas (MIG), ASTM A36 Steel Plate, Magnetic Particle Test, Macrostructure*

Abstrak. *Dalam perkembangan teknologi dan industri, baja merupakan salah satu material penting, dibuktikan dengan pemakaiannya yang sudah umum dalam dunia manufaktur, maritim, bahan bangunan, perpipaan, oil and gas. Oleh karena itu, penting untuk mempelajari dan mengoptimalkan parameter proses pengelasan untuk meningkatkan kualitas sambungan dan meminimalkan cacat. Penelitian ini bertujuan untuk mencari berbagai kombinasi parameter proses MIG (Metal Inert Gas) untuk pengelasan baja dengan variasi kuat arus dan pendingin. Metode penelitian ini yaitu dengan melakukan proses pengelasan MIG (Metal Inert Gas) kemudian dilakukan pengujian magnetik partikel dan makrostruktur. Hasil penelitian ini yang terbaik (minimal cacat) yaitu spesimen 5 dengan parameter 100 Ampere dan pendingin udara dan hasil terburuk yaitu spesimen 6 dengan parameter 100 Ampere dan pendingin oli dan hasil pengujian makrostruktur terbaik yaitu spesimen 8 dengan parameter 120 Ampere dan pendingin udara dan hasil terburuk yaitu adalah spesimen 9 dengan parameter 120 Ampere dan pendingin oli.*

Kata Kunci – *Metal Inert Gas (MIG), Plat Baja ASTM A36, Partikel Magnetic Test, Makrostruktur.*

I. PENDAHULUAN

Dalam perkembangan teknologi dan industri, baja merupakan salah satu material penting, dibuktikan dengan pemakaiannya yang sudah umum dalam dunia manufaktur, maritim, bahan bangunan, perpipaan, oil and gas, maupun penggunaan substansial yang lain. Hal ini dikarenakan baja memiliki kelebihan pada kekuatan, ketersediaan bahan, versatility, sifat mekanis, dan tingkat ekonomis yang rendah dari pada material yang lain [1]. Plat baja ASTM A36 ialah salah satu jenis paling umum digunakan dalam aplikasi struktural. Plat baja karbon ringan ini mengandung paduan kimia yang memberikan sifat keuletan dan kekuatan yang ideal untuk digunakan dalam berbagai struktur seperti jembatan, konstruksi bangunan, tanki, maupun pipa [2]. Las MIG (Metal Inert Gas) ialah las busur gas yang menggunakan kawat elektroda berupa gulungan kawat (rol) yang gerakannya diatur oleh motor listrik. Proses pengelasan menggunakan arus searah (DC) dengan menggunakan arus sekitar 50A-600A dan gas yang digunakan pada saat pengelasan yakni gas argon dan helium [3].

Pengelasan MIG (Metal Inert Gas) tidak selalu mudah dilakukan karena sifatnya yang reaktif terhadap oksigen, yang dapat menyebabkan terbentuknya oksida yang mengganggu kualitas pengelasan [4]. Oleh karena itu, penting untuk mempelajari dan mengoptimalkan parameter proses pengelasan untuk meningkatkan kualitas sambungan dan meminimalkan cacat [5]. Pada pengelasan MIG (Metal Inert Gas) terdapat berbagai macam cacat pengelasan, antara lain undercutting, porositas, slag inclusion, crack/ retak dan kurang penetrasi atau penembusan yang kurang sempurna [6]. Cacat pengelasan berbahaya sekali terhadap sifat mekanik dari sambungan pengelasan tersebut, apalagi sambungan Tumpang (LAP Joint) posisi benda kerjanya saling tindih serta posisi pengelasannya berada di tengah sudut ke dua benda. Cacat pengelasan yang terjadi tersebut sering sekali tidak disadari bahkan sesaat setelah dilapisi coating. Salah satu metode yang bisa digunakan untuk mengetahui retak tersebut yaitu menggunakan metode Magnetic Particle Inspection (MPI) [7].

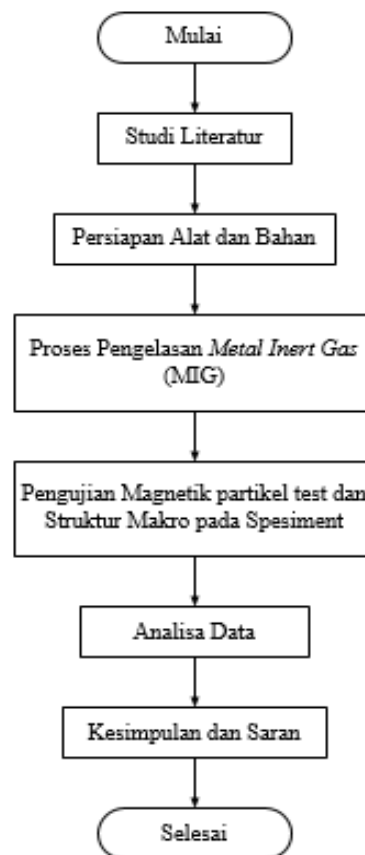
Salah satu cara untuk memperbaiki sifat dan mekanis suatu bahan ialah melalui proses pendinginan (*refrigasi*) [8]. Oleh karena itu dilakukan penelitian pengelasan menggunakan MIG (*Metal Inert Gas*) dengan metode pendinginan air, oli, dan udara pada material plat ASTM A36. Melalui proses ini apakah metode pendinginan menggunakan air, oli, dan udara dapat mempengaruhi hasil pengujian magnetic partikel dan makro pada material tersebut [9].

Berdasarkan uraian diatas, penulis mengambil judul “Analisa Pengaruh Variabel Kuat Arus Dan Pendingin Air, Oli, Udara Terhadap Hasil Uji Partikel Magnetik Dan Uji Makro Pengelasan MIG (*Metal Inert Gas*) Pada Plat Baja ASTM A36”. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi berbagai kombinasi parameter proses MIG (*Metal Inert Gas*) untuk pengelasan baja, dengan fokus khusus pada pengaruhnya terhadap hasil pengujian magnetic partikel dan makrostruktur. Melalui analisis mendalam terhadap hasil pengujian, diharapkan dapat ditemukan hubungan antara parameter proses dengan karakteristik material yang dihasilkan dalam hal ini adalah magnetic partikel dan makro pada zona las. Hasil dari studi ini dapat memberikan panduan berharga bagi praktisi industri dalam pengoptimalan proses pengelasan baja besi 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

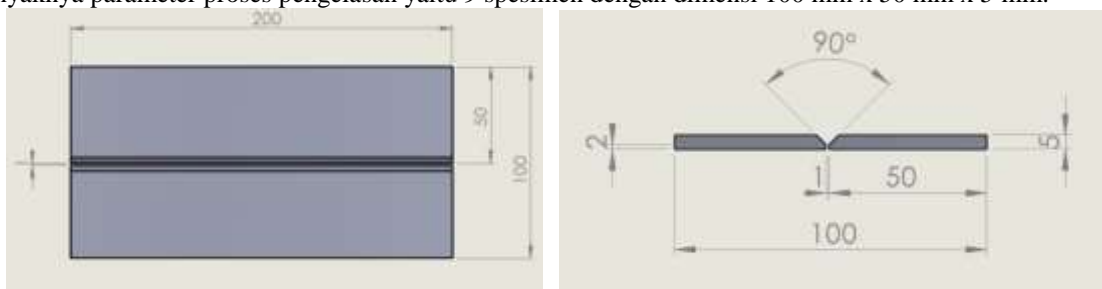
B. Studi Literatur

Studi literatur ini di lakukan sebagai tahap awal dan juga sebagai landasan materi dengan mempelajari beberapa refrensi dari jurnal, artikel, buku, tugas akhir yang berkaitan, pengamatan scara langsung di lapangan, juga dari media internet, dan diskusi dengan dosen pembimbing yang ada kaitannya dengan besar perencanaan tinjauan parameter pengelasan MIG (*Metal Inert Gas*) Terhadap hasil pengujian magnetic partikel dan makro [10].

C. Persiapan Alat dan Bahan

Persiapan alat dan bahan yang perludilakukan untuk melakukan pengelasan MIG (*Metal Inert Gas*) juga pengujian magnetic partikel dan pengujian makro spesimen yaitu sebagai berikut.

1. Mesin Las MIG merk LAKONI TIPE MIG 160i
Mesin las MIG merk LAKONI TIPE MIG 160i pada penelitian ini digunakan untuk proses pengelasan dengan menyambungkan antar plat baja ASTM A36 dengan menggunakan elektroda fluxcore diameter 1 mm sehingga membentuk spesimen dengan menggunakan parameter yang telah ditentukan [11]. Parameter yang dirubah dari mesin las yaitu kuat arusnya yaitu 80 A, 100 A, 120 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* [12].
3. Alat Uji Magnetik Partikel Test
Pengujian partikel magnetik adalah metode pengujian non-destruktif, yang dapat digunakan untuk memeriksa berbagai komponen dan produk feromagnetik. Ini termasuk pengecoran, penempaan, dan pengelasan [13]. Metode ini digunakan di berbagai sektor industri, terutama saat menentukan apakah sesuatu komponen layak untuk digunakan. Kebocoran medan magnet ini mengindikasikan adanya cacat pada material. Cara yang digunakan untuk mendeteksi adanya kebocoran medan magnet adalah dengan menaburkan partikel magnetik dipermukaan. Partikel-partikel tersebut akan berkumpul pada daerah kebocoran medan magnet [14].
4. Alat Uji Metalografi
Pengujian metalografi harus membutuhkan alat khusus untuk mendapatkan hasil yang maksimal pada makrostruktur yaitu menggunakan mikroskop yang mampu melakukan pembesaran hingga 50x [15]. Alat dibawah ini bermerk OLYMPUS BX53M yang digunakan untuk melihat stuktur makro pada plat baja ASTM A36.
5. Plat Baja ASTM A36
Plat baja ASTM A36 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 2. Dimensi Spesimen Pengelasan

a) Proses Pengelasan *Metal Inert Gas* (MIG) pada Plat Baja ASTM A36

Spesimen plat baja ASTM A36 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	Struktur Makro
1	80	Air	-
2	80	Udara	-
3	80	Olie	-
4	100	Air	-
5	100	Udara	-
6	100	Olie	-
7	120	Air	-
8	120	Udara	-
9	120	Olie	-

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

1. Siapkan mesin las, elektroda, meja untuk pengelasan dan plat baja ASTM A36 yang akan digunakan.
2. Jig atau klem plat aluminium yang telah disiapkan untuk mencegah terjadinya proses pemuaian pada plat.
3. Atur Parameter mesin las MIG 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 3. Proses Pengelasan *Metal Inert Gas* (MIG)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Uji Partikel Magnetik

Pengujian Partikel Magnetik dilakukan dengan pengujian kering yaitu teknik pengujian non-destruktif yang digunakan untuk mendeteksi cacat pada permukaan dan di bawah permukaan material. Teknik ini dilakukan dengan cara menaburkan bubuk magnetik pada permukaan objek yang telah dimagnetisasi. Berikut dibawah ini merupakan hasil uji magnetic partikel dari proses pengelasan *Metal Inert Gas* (MIG).

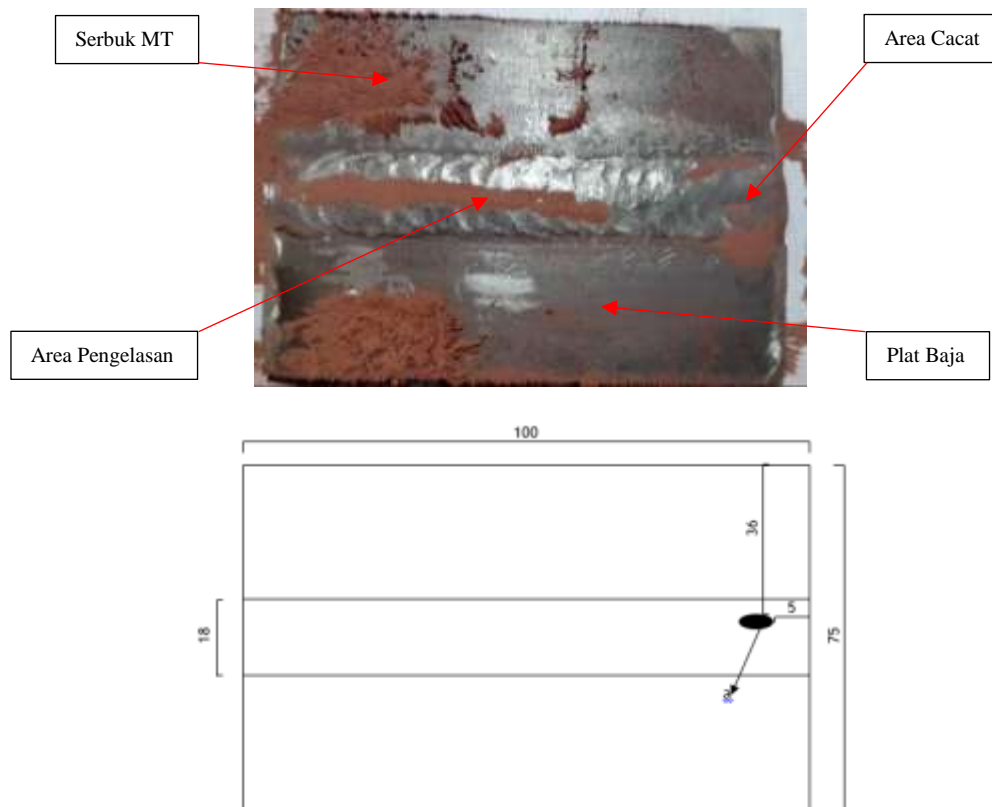


Gambar 4. Proses Uji Partikel Magnetik

Berikut adalah langkah –langkah proses uji partikel magnetik :

1. Permukaan sambungan las dibersihkan dan dikeringkan untuk menghilangkan kotoran, minyak, lemak, atau kontaminan lain yang dapat mengganggu proses pengujian.
2. Sambungan las dimagnetisasi dengan menggunakan arus listrik, kuk elektromagnetik, atau metode lain yang sesuai. Arah medan magnet harus dipilih dengan hati-hati agar dapat mendeteksi cacat yang mungkin ada.
3. Taburkan sebuk feromagnetik pada weld metal pengelasan yang dimagnetisasi secara perlahan dan merata. Partikel magnetik dapat diaplikasikan dalam bentuk suspensi basah atau kering.
4. Permukaan sambungan las diperiksa secara visual untuk melihat adanya penumpukan partikel magnetik yang menunjukkan adanya cacat. Cacat dapat berupa retak, inklusi, porositas, atau cacat lainnya. Interpretasi hasil inspeksi dilakukan dengan melihat pola penumpukan partikel magnetik.
5. Partikel magnetik yang tersisa dibersihkan dari permukaan sambungan las. Pembersihan dapat dilakukan dengan menggunakan sikat, penyedot debu, atau metode lain yang sesuai.

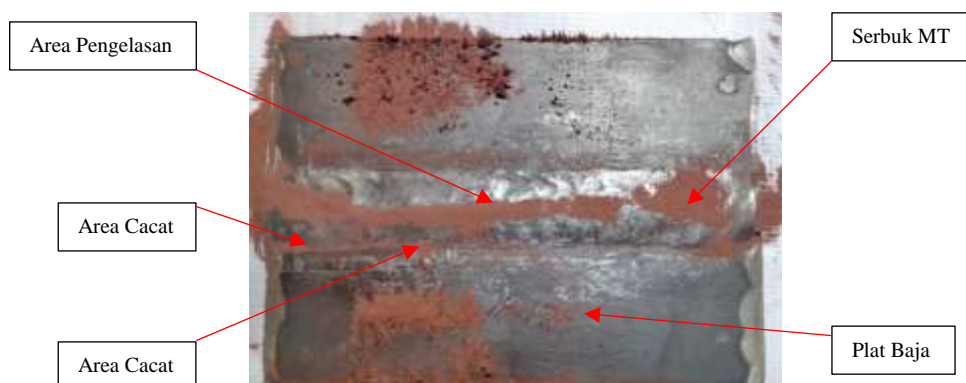
1. Spesimen 5 atau X5 (100 Ampere Pendingin Udara)

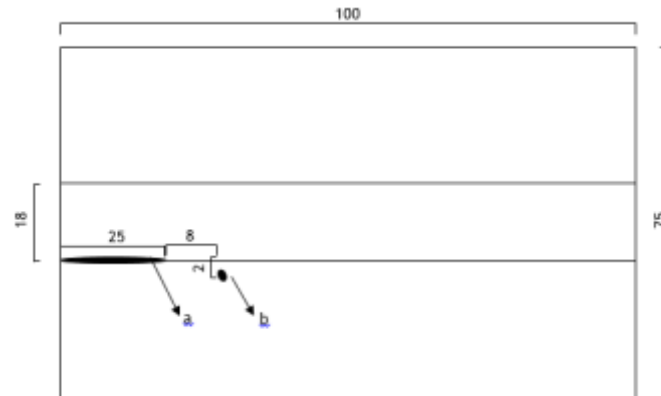


Gambar 5. Hasil Uji Magnetik Partikel Spesimen 5

Pada **Gambar 5.** Hasil pengujian *magnetic partikel* pada spesimen 5 dengan parameter 100 ampere pendingin udara terdapat cacat pengelasan *rounded* dengan diameter 8 mm.

2. Spesimen 6 atau X6 (100 Ampere Pendingin Oli)





Gambar 6. Hasil Uji Magnetik Partikel Spesimen 6

Pada **Gambar 6.** Hasil pengujian *magnetic partikel* pada spesimen 6 dengan parameter 100 ampere pendingin oli terdapat cacat pengelasan *linear* dan *rounded*. yaitu pada cacat *linear* dengan *length* 12 mm dan *width* 3 mm dan pada cacat *rounded* berdiameter 6 mm.

B. Uji Makrostruktur

Pengujian Mikrostruktur dilakukan dengan alat Mikroskop Optik menggunakan mikroskop 50 x. Berikut hasil dari pengambilan makrostruktur pengelasan *Metal Inert Gas* (MIG) plat baja ASTM A36 dengan uji makrostruktur. Berikut dibawah ini adalah hasil uji makrostruktur dari proses pengelasan *Metal Inert Gas* (MIG).

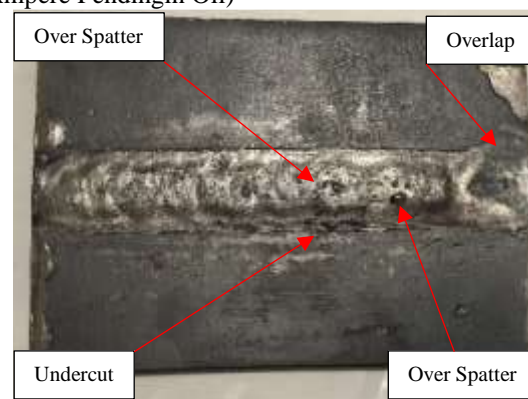
1. Spesimen 8 atau Y8 (120 Ampere Pendingin Udara)



Gambar 7. Makrostruktur Spesimen 8

Sesuai dengan **Gambar 7.** Berdasarkan parameter 120 Ampere dan pendingin udara, dimana tidak terdapat cacat pada spesimen pengelasan.

2. Spesimen 9 atau Y9 (120 Ampere Pendingin Oli)



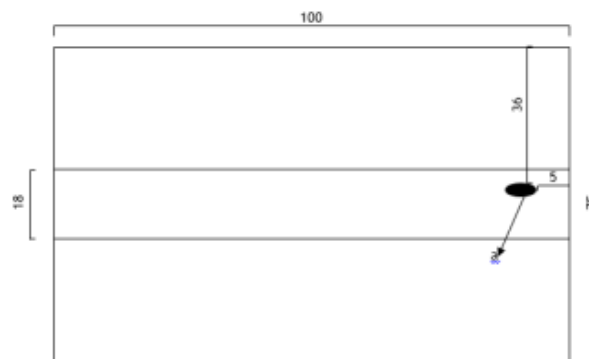
Gambar 8. Makrostruktur Spesimen 9

Sesuai dengan **Gambar 8**. Berdasarkan parameter 120 Ampere dan pendingin oli, dimana terdapat 1 cacat pengelasan *undercut* yaitu cerukan yang terjadi pada *base metal*, 1 cacat overlap yaitu pengelasan melebihi kampuh las dan 2 cacat *over spatter* pada spesimen pengelasan, karena ampere pengelasan yang tinggi.

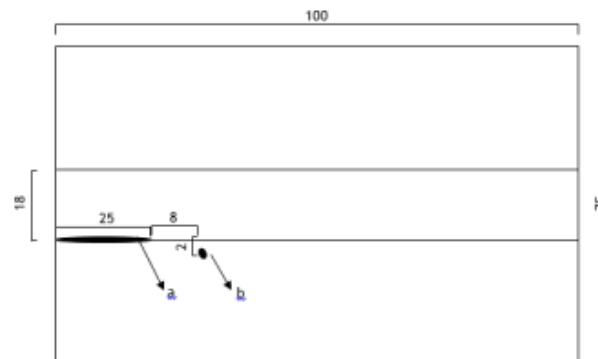
C. Analisa dan Pembahasan Hasil Uji Pengamatan Struktur Makro

Untuk memudahkan pemahaman pada data dari hasil uji magnetik partikel dan uji makrostruktur dilakukan proses analisa pada hasil pengelasan *Metal Inert Gas* (MIG). Tujuan analisa ini guna visualisasi yang lebih baik dan lebih mudah dimengerti.

Berdasarkan pada uji magnetik partikel dari 9 spesimen dengan parameter proses yang dilakukan pengujian diperoleh hasil terbaik yaitu spesimen 5 dengan parameter 100 Ampere dan pendingin udara karena pada spesimen 5 dengan parameter 100 ampere pendingin udara terdapat cacat pengelasan *rounded* dengan diameter 8 mm, kemudian hasil terburuk adalah spesimen 6 dengan parameter 100 Ampere dan pendingin oli karena terdapat cacat pengelasan *linear* dan *rounded*. yaitu pada cacat *linear* dengan *length* 12 mm dan *width* 3 mm dan pada cacat *rounded* berdiameter 6 mm.



Gambar 9. Hasil Pengujian Magnetik Partikel Terbaik

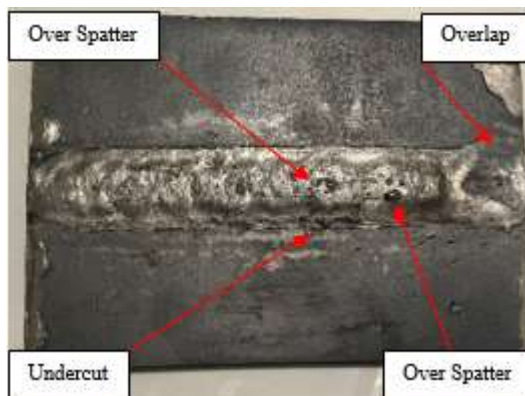


Gambar 10. Hasil Pengujian Magnetik Partikel Terburuk

Berdasarkan pada uji makrostruktur partikel dari 9 spesimen dengan parameter proses yang dilakukan pengujian diperoleh hasil terbaik yaitu spesimen 8 dengan parameter 120 Ampere dan pendingin udara karena dimana tidak terdapat cacat pada spesimen pengelasan, kemudian hasil terburuk adalah spesimen 9 dengan parameter 120 Ampere dan pendingin oli karena dimana terdapat 1 cacat pengelasan *undercut* yaitu cerukan yang terjadi pada *base metal*, 1 cacat overlap yaitu pengelasan melebihi kampuh las dan 2 cacat *over spatter* pada spesimen pengelasan, karena ampere pengelasan yang tinggi.



Gambar 11. Hasil Pengujian Makrostruktur Terbaik



Gambar 12. Hasil Pengujian Makrostruktur Terburuk

IV. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisa dari “Analisis Pengaruh Variasi Kuat Arus terhadap Struktur Makro Hasil Pengelasan MIG (Metal Inert Gas) pada Plat Baja ASTM A36” dapat disimpulkan :

1. Pengujian magnetik partikel dari 9 spesimen dengan parameter proses yang dilakukan pengujian diperoleh hasil terbaik yaitu spesimen 5 dengan parameter 100 Ampere dan pendingin udara karena pada spesimen 5 dengan parameter 100 ampere pendingin udara terdapat cacat pengelasan *rounded* dengan diameter 8 mm, kemudian hasil terburuk adalah spesimen 6 dengan parameter 100 Ampere dan pendingin oli karena terdapat cacat pengelasan *linear* dan *rounded*. yaitu pada cacat *linear* dengan *length* 12 mm dan *width* 3 mm dan pada cacat *rounded* berdiameter 6 mm.
2. Pengujian makrostruktur partikel dari 9 spesimen dengan parameter proses yang dilakukan pengujian diperoleh hasil terbaik yaitu spesimen 8 dengan parameter 120 Ampere dan pendingin udara karena dimana tidak terdapat cacat pada spesimen pengelasan, kemudian hasil terburuk adalah spesimen 9 dengan parameter 120 Ampere dan pendingin oli karena dimana terdapat 1 cacat pengelasan *undercut* yaitu cerukan yang terjadi pada *base metal*, 1 cacat *overlap* yaitu pengelasan melebihi kampuh las dan 2 cacat *over spatter* pada spesimen pengelasan, karena ampere pengelasan yang 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] W. Marthiana et al., "Analisa Pengaruh Variasi Arus Listrik Pengelasan Terhadap Kekuatan Sambungan Pengelasan MIG Pada Material ST 37," *Jurnal Kajian Teknik Mesin*, vol. 5, no. 2, pp. 140-144, 2020.
- [2] I. N. Sihombing, S. Jokosiworo, and B. A. Aditya, "Pengaruh Posisi Pengelasan dan Bentuk Kampuh Terhadap Kekuatan Tarik dan Mikrografi Sambungan Las Metal Inert Gas (MIG) Pada Aluminium 6061 Sebagai Bahan Material Kapal," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 7, no. 4, 2019.
- [3] R. Wurdhani, U. Budiarto, and W. Amiruddin, "Pengaruh Perlakuan Panas (Heat Treatment) Normalizing Terhadap Kekuatan Impak Aluminium 6061 Pengelasan MIG dengan Variasi Posisi dan Bentuk Kampuh," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 9, no. 1, pp. 70-78, 2020.
- [4] A. Sebayang, E. Tarigan, and L. Tarigan, "Pengaruh Variasi Arus Pengelasan 120 A, 130 A, 140 A, dan 150 A terhadap Kekuatan Tarik pada Material ST 37 dengan Metode Pengelasan Metal Inert Gas (MIG)," *Jurnal Pustaka Cendekia Hukum dan Ilmu Sosial*, vol. 2, no. 1, pp. 118-124, 2024.
- [5] Y. R. Fauzi and M. Arsyad, "Pengaruh Post Weld Heat Treatment Proses Pengelasan MIG Terhadap Kekuatan Tarik Baja Karbon AISI 1045," *Journal of Energy, Materials, & Manufacturing Technology*, vol. 3, no. 02, pp. 9-14, 2024.
- [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. 2022
- [7] A. F. Al Faridzi, "Ketahanan Baja Astm A36 Terhadap Pengujian Tarik Dan Bending Dengan Proses Pengelasan Smaw Dan Metalografi," *Rekayasa Sistem Energi dan Manufaktur (ReSEM)*, vol. 2, no. 2, pp. 109-118, 2024.
- [8] W. Fsw, T. Sifat, M. Dan, M. Pada, dan A. Paduan, *Pengaruh Kecepatan Feedrate Friction Stir*, no. November 2021. 2021.
- [9] R. H. Aruan, H. Pratikno, and Y. S. Hadiwidodo, "Analisis Pengaruh Suhu Material Pada Pengaplikasian Coating Epoxy Terhadap Kekuatan Adhesi Baja A36," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 12, no. 1, pp. F34-F40, 2023.
- [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. 2023.
- [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. 2023.
- [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.