

PENGARUH KECEPATAN PENGELASAN MIG TERHADAP KEKUATAN TARIK DAN PERUBAHAN STRUKTUR PATAHAN MAKRO PADA SAMBUNGAN ALUMINIUM

Kris Witono¹, Talifatim Machfuroh^{2*}, Lisa Agustriyana³, Siti Duratun Nasiqiati Rosady⁴

¹⁻⁴ Prodi D4 Teknik Mesin Produksi dan Perawatan, Politeknik Negeri Malang

¹kris.witono@polinema.ac.id

²talifatim.machfuroh@polinema.ac.id

³ lisa.agustriyana@polinema.ac.id

⁴sitiduratun@polinema.ac.id

Abstrak— Pengelasan MIG (*Metal Inert Gas*) merupakan proses pengelasan yang menggunakan elektroda gulung (filler metal) yang sama dengan logam induk (base metal) dan menggunakan gas pelindung (inert gas). Aluminium merupakan salah satu logam yang paling umum digunakan dalam dunia industri. Penyambungan aluminium dengan pengelasan menjadi tantangan tersendiri karena konduktivitas panasnya yang tinggi, sehingga panas yang diterima lebih cepat menyebar ke area lainnya. Oleh karena itulah banyak dilakukan penelitian tentang pengelasan aluminium. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian terkait pengaruh parameter pengelasan terhadap sambungan aluminium menjadi sangat penting untuk dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh kecepatan las terhadap kekuatan tarik dan struktur makro hasil las robotik pada aluminium. Penelitian dilakukan dengan metode eksperimen dan pengamatan struktur makro hasil patahan. Berdasarkan hasil penelitian, diketahui bahwa perubahan kecepatan las (kecepatan las) pada proses pengelasan MIG aluminium menunjukkan tren penurunan kekuatan tarik maksimum. Kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada variasi TS 40 mm/menit, sedangkan pada TS 70 mm/menit kekuatan tarik semakin rendah. Semakin tinggi kecepatan las, kekuatan tarik yang dihasilkan semakin rendah. Hal ini disebabkan oleh berkurangnya panas yang diberikan yang mempengaruhi penetrasi las dan penyambungan logam. Kecepatan las yang lebih rendah menghasilkan penetrasi yang lebih baik dan kekuatan tarik yang lebih tinggi, tetapi kecepatan yang terlalu lambat dapat menyebabkan panas berlebih dan merusak struktur mikro logam. Berdasarkan struktur makro patahan, diketahui bahwa kecepatan las yang lebih tinggi menyebabkan patahan cenderung getas dengan cacat seperti porositas, yang juga dapat menurunkan kekuatan tarik.

Kata Kunci— MIG; aluminium; robotic; pengelasan

Abstract— MIG (*Metal Inert Gas*) welding is a welding process that uses rolled electrodes (filler metal) which are the same as the base metal (base metal) and uses a protective gas (inert gas). Aluminum is one of the most commonly used metals in the industrial world. Connecting aluminum by welding is a challenge in itself because of its high heat conductivity, so the heat received spreads more quickly to other areas. This is why a lot of research has been carried out on welding aluminum. Based on this background, research related to the influence of welding parameters on aluminum joints is very important to carry out. This research aims to investigate the effect of travel speed on the tensile strength and macro structure of welds from the robotic welding process on aluminum. The research was carried out using experimental methods and observing the macro structure of the fracture results. Based on the research results, it was found that changes in welding speed (travel speed) in the aluminum MIG welding process showed a decreasing trend in maximum tensile strength. The highest tensile strength was obtained at the TS variation of 40 mm/minute, while at TS 70 mm/minute the tensile strength was lower. The higher the welding speed, the lower the resulting tensile strength. This is due to reduced heat applied which affects weld penetration and metal joining. A lower welding speed results in better penetration and higher tensile strength, but a speed that is too slow can cause overheating and damage the metal microstructure. Based on the macro structure of the fracture, it was found that higher welding speeds cause fractures that tend to be brittle with defects such as porosity, which can also reduce tensile strength.

Keywords— MIG; aluminium; robotic; welding

PENDAHULUAN

Pengelasan *Metal Inert Gas* (MIG) adalah salah satu metode pengelasan yang banyak digunakan dalam industri, terutama dalam pengelasan material logam seperti aluminium [1]. Hal ini

dikarenakan pengelasan MIG mudah digunakan untuk setiap logam. Namun, proses pengelasan MIG juga mempunyai kekurangan diantaranya menyebabkan adanya *lack of penetration*, porositas, retakan, dan struktur yang kasar [1][2][3][4][5].

Beberapa variasi dari pengelasan MIG banyak dikembangkan untuk mengatasi masalah tersebut, seperti *Clean MIG* yang menggunakan gas argon murni sebagai pelindung dapat menghasilkan sambungan las berkekuatan tinggi dan ketangguhan tinggi [6]. Namun teknik ini memiliki kekurangan berupa busur yang tidak stabil dan penetrasi yang rendah [1]. *Pulse-MIG* juga dikembangkan sebagai solusi pengelasan MIG dengan menggunakan gelombang arus berdenyut untuk mengontrol laju transfer logam dengan lebih tepat [7]. Metode lain yang dikembangkan yaitu *Laser-MIG hybrid welding* yang menawarkan manfaat dari *Clean MIG* dan *Pulse-MIG*, meskipun begitu *laser-MIG hybrid welding* tetap memiliki tantangan *defect* yaitu retakan dan porositas [8][9][10].

Aluminium merupakan material yang memiliki sifat ringan, tahan korosi, serta mudah dibentuk [11], sehingga banyak digunakan dalam berbagai aplikasi seperti otomotif [12], industri kedirgantaraan [13], dan konstruksi [14][11]. Namun, pengelasan aluminium tidak selalu mudah karena sifat logam ini yang memiliki konduktivitas termal tinggi dan kecenderungan membentuk oksida saat terkena udara, yang dapat mempengaruhi kualitas sambungan [15][16].

Kecepatan pengelasan merupakan salah satu parameter penting dalam proses pengelasan MIG. Kecepatan pengelasan yang tepat dapat menghasilkan sambungan yang kuat dan minim cacat. Sebaliknya, kecepatan pengelasan yang terlalu tinggi atau rendah dapat menyebabkan cacat pada sambungan, seperti porositas, retak, atau deformasi yang dapat mempengaruhi kekuatan tarik sambungan dan mikrostruktur patahan. Oleh karena itu, penting untuk memahami bagaimana variasi kecepatan pengelasan MIG mempengaruhi kekuatan tarik dan perubahan struktur patahan, baik pada skala makro maupun mikrostruktur sambungan aluminium.

Li et al. melakukan analisa tentang perubahan mikrostruktur sambungan T pada pelat paduan aluminium 6061-T6 dengan ketebalan 4 mm dan A356-T6 yang dilas menggunakan metode *pulse-MIG*. Daerah lasan terbentuk dari struktur dendritik dan kolumnar [17]. Huang et al. mengamati pengaruh pengelasan *hybrid laser-arc* pada mikrostruktur sambungan paduan aluminium 5083. Proses pengelasan *hybrid laser-arc* menghasilkan sambungan lasan yang mempunyai ukuran butir yang lebih besar dan kekuatan sambungan yang lebih tinggi, yaitu 269 MPa. Kondisi ini disebabkan oleh berkurangnya porositas pada sambungan lasan yang dihasilkan [18]. Yan et al. menjelaskan pengaruh parameter proses terhadap perilaku mikrostruktur pada pengelasan *hibrida laser-MIG* pada paduan aluminium yang berbeda yaitu AA5083 dan AA6082. *Filler* yang digunakan sebagai pengisi lasan adalah ER4043 dan ER5356. Pengujian yang digunakan untuk mengamati mikrostruktur daerah lasan yaitu SEM, EDS, dan EBSD. Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan menunjukkan bahwa zona fusi dengan material pengisi ER4043 memiliki ukuran butir lebih halus yaitu 49 hingga 63 μm , namun kepadatan pori yang lebih tinggi ditemukan di zona fusi tersebut [19]. Zhao et al. melaporkan pada penelitiannya bahwa mikrostruktur sambungan las paduan aluminium 5A06, di mana ukuran butir di wilayah yang didominasi oleh pengelasan

hibrida laser-MIG lebih halus dibandingkan dengan wilayah yang didominasi oleh laser saja [20]. Selain itu, Dewanto, et al, meneliti tentang analisa kekuatan mekanik sambungan las metode MIG dan metode *Friction Stir Welding (FSW)* 800 rpm pada aluminium tipe 5083 [21]. Sihombing, et al meneliti tentang pengaruh posisi pengelasan dan bentuk kampuh terhadap kekuatan tarik dan mikrografi sambungan las metal inert gas (mig) pada aluminium 6061 sebagai bahan material kapal [22]. Iswanto et al. melakukan analisa perbandingan kekuatan hasil pengelasan TIG dan pengelasan MIG pada Aluminium 5083 [23]. Kris, et al meneliti kekuatan sambungan las bimetal baja dan stainless steel dengan memvariasikan parameter pengelasan *travel speed* dan panjang *stickout* pada baja bimetal dengan *robotic MIG welding* [24].

Pengelasan aluminium mempunyai kerumitan tersendiri dibandingkan baja lain, karena sifat termal dan oksidasi yang berbeda. Oleh karena itu penelitian sambungan lasan pada aluminium menjadi sangat penting dan layak dilakukan karena penelitian ini tidak hanya relevan bagi industri yang menggunakan pengelasan aluminium, tetapi juga dapat memberikan kontribusi yang signifikan dalam pengembangan teknologi dan ilmu pengetahuan di bidang manufaktur. Pengaruh kecepatan pengelasan MIG terhadap kekuatan tarik, struktur patahan makro, pada sambungan aluminium juga sangat penting untuk dikembangkan. Karena kecepatan pengelasan merupakan *variable* yang sangat penting dalam pengelasan. Selain menggunakan pengelasan MIG, penelitian ini secara khusus menganalisis hubungan antara variasi kecepatan pengelasan terhadap distribusi panas dan karakteristik patahan makro pada sambungan aluminium seri 6061. Pendekatan ini memberikan kontribusi ilmiah dan praktis dalam optimasi parameter pengelasan untuk aplikasi industri yang membutuhkan kualitas sambungan tinggi dan pengulangan hasil yang stabil.

METODE

Metode yang digunakan dari penelitian ini adalah metode eksperimental dan analisis yang sistematis. Sistematika penelitian yang dilakukan adalah:

a. Persiapan material dan sampel

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah aluminium dengan seri 6061 dengan tebal 3 mm. Pemilihan material didasarkan pada kegunaannya yang banyak untuk aplikasi struktural yang memerlukan kekuatan tinggi namun ringan.

b. Proses pengelasan

Setelah material dipotong, maka dilakukan proses penyambungan dengan pengelasan MIG yang dioperasikan dengan variasi *travel speed* 40 mm/menit, 50 mm/menit, 60 mm/menit, dan 70 mm/menit. Pengaturan kuat arus yang digunakan adalah 110 A, 115 A, dan 125 A. Kawat isian yang digunakan dalam proses pengelasan adalah tipe ER4043 dengan diameter 0,8 mm. Parameter pengelasan seperti tegangan, jenis gas pelindung (Argon), serta panjang *stickout* disesuaikan dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Kris

et. Al. [24] dan harus dijaga konstan selama pengelasan agar pengaruh utama berasal dari kecepatan pengelasan.

c. Pengujian tarik

Pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan standar uji tarik ASTM E8M seperti tampak pada gambar 1. Setiap sampel ditarik menggunakan mesin uji tarik untuk mengukur *ultimate tensile strength* (UTS) dan *elongation*. Pengujian ini dilakukan untuk setiap variasi kecepatan pengelasan untuk mendapatkan data tentang pengaruh *travel speed* terhadap kekuatan tarik. Setiap variasi dilakukan pengulangan pengujian sebanyak 3 kali.

d. Pengamatan patahan makro

Setelah dilakukan pengujian tarik, patahan pada setiap sampel diamati secara makroskopik untuk melihat bentuk patahan. Pengamatan difokuskan pada patahan makro (makrostruktur). Oleh karena itu, analisis yang dilakukan terbatas pada ciri-ciri visual makroskopik seperti bentuk patahan, keberadaan necking, serta indikasi porositas dan retakan permukaan. Pengamatan dilakukan secara langsung menggunakan kamera digital beresolusi tinggi pada jarak dan pencahayaan terkontrol tanpa proses etsa atau pembesaran mikroskopis. Pendekatan makroskopik ini dipilih untuk menilai karakteristik umum deformasi dan mode patahan pada skala visual yang relevan dengan performa mekanik hasil uji tarik.

e. Analisis dan Diskusi

Hasil analisis data disusun dalam laporan penelitian yang jelas dan terstruktur. Laporan ini mencakup deskripsi metode analisis, temuan utama, interpretasi hasil, dan implikasi temuan tersebut dalam konteks penelitian yang lebih luas.



Gbr 1. Pembuatan spesimen uji Tarik

HASIL DAN DISKUSI

a. Perubahan kekuatan tarik sambungan

Setelah dilakukan proses pengelasan, kemudian material dibentuk sesuai dengan bentuk *specimen* uji tarik. Data hasil pengujian tarik yang dilakukan dijabarkan pada tabel 1, tabel 2, dan tabel 3, berikut:

TABEL 1
DATA HASIL PENGUJIAN TARIK PADA KUAT ARUS 110 A

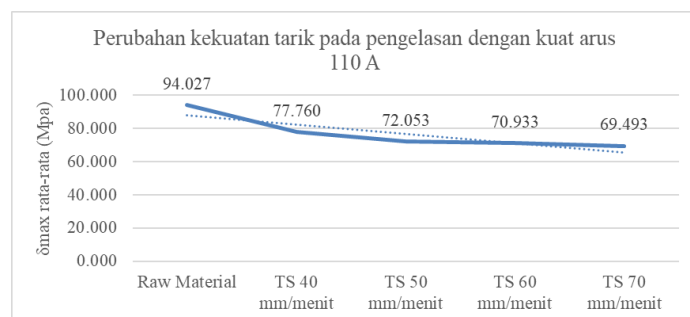
Spesimen	δu (Mpa)	Rata-rata (Mpa)	ϵ (%)	Rata-rata (%)
Raw Material	93,4297	94,0267	12,92%	13,62%
	94,0237		13,72%	
	94,6267		14,22%	
TS 40 cm/menit	77,9600	77,7600	12,64%	11,86%
	78,3600		11,86%	
	76,9600		11,08%	
TS 50 cm/menit	72,5633	72,0533	12,18%	13,18%
	71,5833		14,18%	
	72,0133		13,18%	
TS 60 cm/menit	71,4133	70,9333	12,22%	11,42%
	70,3503		10,40%	
	71,0363		11,64%	
TS 70 cm/menit	70,1933	69,4933	15,04%	14,94%
	69,0903		14,54%	
	69,1963		15,24%	

TABEL 2
DATA HASIL PENGUJIAN TARIK PADA KUAT ARUS 115 A

Spesimen	δu (Mpa)	Rata-rata (Mpa)	ϵ (%)	Rata-rata (%)
Raw Material	93,4297	94,0267	12,92%	13,62%
	94,0237		13,72%	
	94,6267		14,22%	
TS 40 cm/menit	75,8057	75,1467	11,34%	10,54%
	74,1497		10,24%	
	75,4847		10,04%	
TS 50 cm/menit	73,0287	74,0267	14,24%	14,94%
	74,0469		15,44%	
	75,0047		15,14%	
TS 60 cm/menit	71,4467	71,1467	13,32%	12,74%
	70,6867		12,28%	
	71,3067		12,62%	
TS 70 cm/menit	69,2000	69,6000	11,34%	10,54%
	70,7000		10,21%	
	68,9000		10,07%	

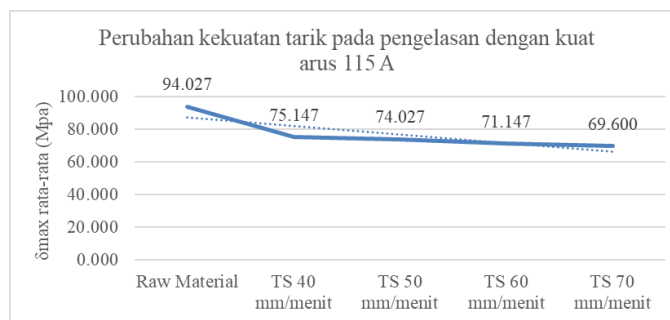
TABEL 3
DATA HASIL PENGUJIAN TARIK PADA KUAT ARUS 125 A

Spesimen	δu (Mpa)	Rata-rata (Mpa)	ϵ (%)	Rata-rata (%)
Raw Material	93,4297	94,0267	12,92%	13,62%
	94,0237		13,72%	
	94,6267		14,22%	
TS 40 cm/menit	76,1447	75,1467	12,01%	11,42%
	73,6687		11,05%	
	75,6267		11,20%	
TS 50 cm/menit	74,0600	73,9200	13,02%	11,42%
	72,8800		11,32%	
	74,8200		9,92%	
TS 60 cm/menit	71,9967	71,7867	9,49%	9,66%
	70,9767		9,49%	
	72,3867		9,99%	
TS 70 cm/menit	76,1067	76,1067	13,88%	13,18%
	75,1567		12,18%	
	77,0567		13,48%	



Gbr 2. Grafik Perubahan kekuatan tarik pada pengelasan dengan kuat arus 110 A

Gambar 2 merupakan grafik perubahan kekuatan tarik pada pengelasan dengan kuat arus 110 A. Berdasarkan gambar 2., didapatkan hubungan antara perubahan tegangan tarik maksimum akibat perubahan pengaturan *travel speed* las pada *Metal Inert Gas (MIG)*. Perubahan kekuatan tarik maksimum pada lasan aluminium akibat perubahan *travel speed* menunjukkan trend yang menurun jika dibandingkan dengan material induk. Nilai kekuatan tarik rata-rata terbesar hasil pengelasan dihasilkan oleh *travel speed* 40 mm/menit yaitu sebesar 77,760 MPa dan nilai kekuatan tarik rata-rata terkecil dihasilkan oleh *travel speed* 70 mm/menit yaitu sebesar 69,493 MPa.

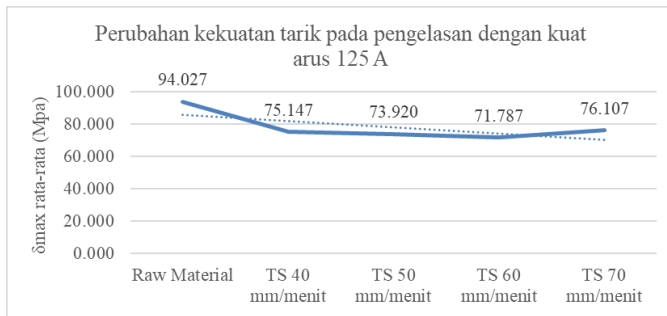


Gbr 3. Grafik Perubahan kekuatan tarik pada pengelasan dengan kuat arus 115 A

Pada pengelasan dengan kuat arus 115 A, perubahan kekuatan tarik maksimum pada lasan aluminium akibat perubahan pengaturan *travel speed* juga menunjukkan *trend* yang menurun jika dibandingkan dengan material induk. Hal ini dapat dilihat pada gambar 3. Nilai kekuatan tarik rata-rata terbesar hasil pengelasan dihasilkan oleh *travel speed* 40 mm/menit yaitu sebesar 75,147 MPa dan nilai kekuatan tarik rata-rata terkecil dihasilkan oleh *travel speed* 70 mm/menit yaitu sebesar 69,600 MPa.

Pada pengelasan dengan kuat arus 125 A (Gambar 4), perubahan kekuatan tarik maksimum pada lasan aluminium akibat perubahan *travel speed* juga menunjukkan *trend* yang menurun jika dibandingkan dengan material induk. Nilai kekuatan tarik rata-rata terbesar hasil pengelasan dihasilkan oleh *travel speed* 70 mm/menit yaitu sebesar 76,107 MPa dan nilai kekuatan tarik rata-rata terkecil dihasilkan oleh *travel speed* 60 mm/menit yaitu sebesar 71,787 MPa.

Berdasarkan hasil pengujian pada kuat arus yang berbeda, perubahan kekuatan tarik pada pengelasan dengan variasi *travel speed* menunjukkan *trend* yang menurun, semakin besar kecepatannya kekuatan tarik maksimumnya semakin berkurang. Dalam pengelasan aluminium, *travel speed* (kecepatan pergerakan *torch* atau elektroda) sangat mempengaruhi distribusi panas, penetrasi las, dan kualitas sambungan. *Travel speed* merupakan salah satu parameter penting dalam pengelasan yang mempengaruhi kekuatan mekanis sambungan. Variasi *travel speed* memberikan hasil yang berbeda terhadap kekuatan tarik sambungan las. Adanya *trend* menurun ini dikarenakan, ketika kecepatan pengelasan meningkat, jumlah panas yang diterapkan pada area lasan menjadi lebih sedikit. Ini dapat menghasilkan suhu yang lebih rendah di zona las sehingga dapat mempengaruhi karakteristik fisik material. Kurangnya panas menyebabkan penetrasi yang dangkal dan penyatuan logam yang kurang sempurna. Material yang tidak cukup panas akan memungkinkan terjadinya cacat rongga atau cacat lain pada lasan, sehingga dapat mempengaruhi kekuatan tarik dari lasan.

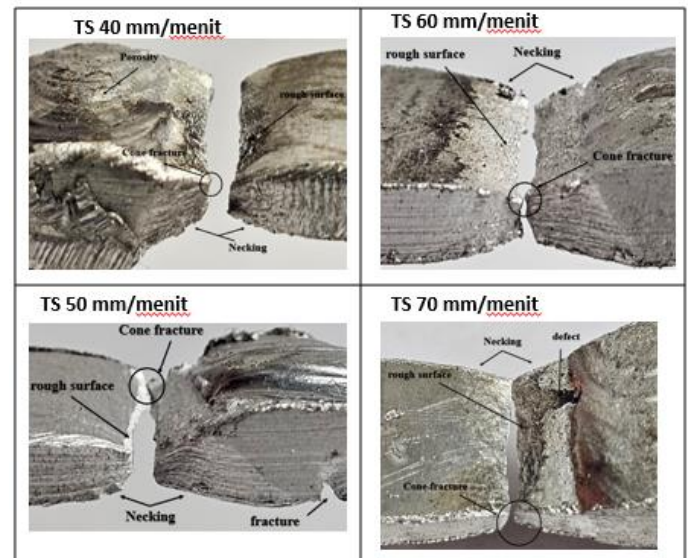


Gbr 4. Grafik Perubahan kekuatan tarik pada pengelasan dengan kuat arus 125 A

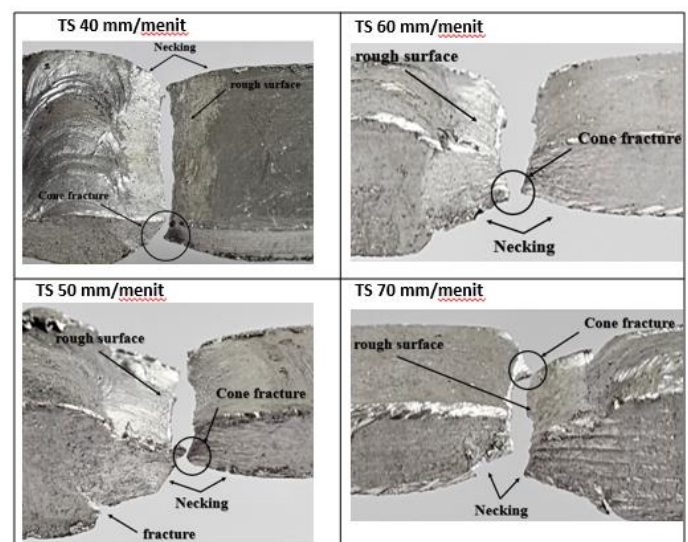
Kecepatan pengelasan yang lebih rendah sering kali menghasilkan penetrasi yang lebih dalam dan lebar, karena lebih banyak waktu tersedia untuk material las menyatu dengan plat aluminium. Penetrasi yang baik dapat meningkatkan kekuatan tarik. Hal ini tampak pada hasil lasan dengan TS 40 mm/menit, tampak hasil lasannya lebar dan memiliki penetrasi yang baik. Sambungan las yang dihasilkan pada travel speed rendah umumnya memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi. Namun, terlalu lambatnya *travel speed* bisa menyebabkan *overheating*, yang dapat mempengaruhi mikrostruktur logam, seperti pembesaran butir atau pembentukan fase yang lebih rapuh di zona yang terkena panas (HAZ). Ini bisa mengurangi ketahanan material terhadap tegangan tarik.

b. Struktur Patahan Makro

Gambar 5 menunjukkan foto makro hasil lasan dengan kuat arus 110 pada setiap perubahan kecepatan pengelasan. Dari hasil foto makro diketahui bahwa bentuk patahan pada setiap variasi *travel speed* adalah sama, yaitu *ductile*. Hal ini ditandai dengan adanya *necking* yang jelas di area patahan. pada variasi TS 40 mm/menit *necking* yang terjadi di area patahan cenderung kecil dan menyempit pada area parahan. Bentuk permukaan patahan juga kasar menandakan adanya aliran plastis yang signifikan di area patah. Pola patahannya berbentuk *cup and cone*, yang menunjukkan bahwa material menyerap energi tarik dalam jumlah besar sebelum patah. Kondisi ini tidak terjadi dengan jelas pada *travel speed* yang lebih tinggi. Berdasarkan gambar terlihat semakin tinggi kecepatannya *necking* yang terjadi cenderung semakin lebar. Pada variasi TS 70 mm/menit *necking* yang terjadi cenderung tidak jelas dan mengarah ke getas.

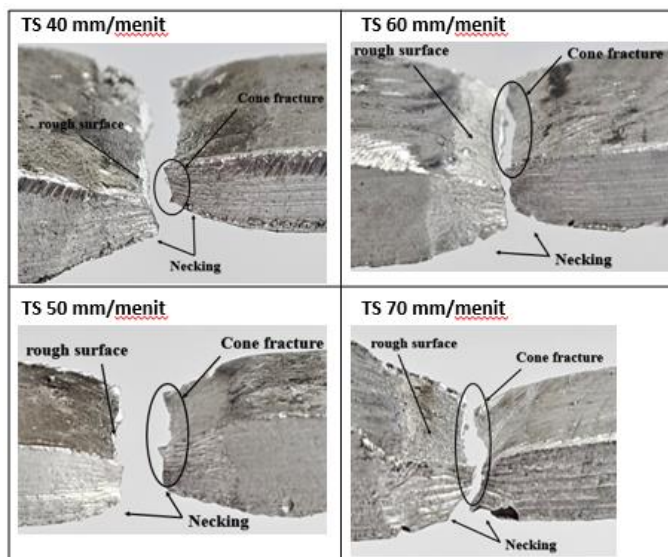


Gbr 5. Foto makro patahan hasil lasan pada kuat arus 110A



Gbr 1. Foto makro patahan hasil lasan pada kuat arus 115A

Pada gambar 6 menunjukkan foto makro dari hasil pengelasan dengan arus 115 A pada setiap variasi kecepatan pengelasan. Dari foto makro tersebut, terlihat bahwa bentuk patahan untuk setiap variasi *travel speed* adalah sama, yaitu patahan *ductile*. Hal ini ditandai dengan adanya *necking* yang jelas di area patahan. Pada *travel speed* 40 mm/menit, *necking* yang terbentuk di area patahan relatif kecil dan menyempit. Namun, semakin tinggi kecepatannya, pola patahannya cenderung mempunyai *necking* yang semakin besar dan cenderung tidak jelas. Pada travel speed 70 mm/menit, *necking* menjadi tidak begitu jelas dan mulai mengarah pada sifat patahan getas.



Gbr 2. Foto makro patahan hasil lasan pada kuat arus 125A

Pada pengelasan dengan kuat arus 125 A, foto makro hasil patahan pada gambar 7 juga memperlihatkan kondisi yang serupa dengan sebelumnya, dimana semakin tinggi kecepatannya, pola patahannya cenderung mempunyai necking yang semakin besar dan cenderung tidak jelas. Pada *travel speed* 70 mm/menit, *necking* menjadi tidak begitu jelas dan mulai mengarah pada sifat patahan getas.

Semakin tinggi *travel speed* mempengaruhi keuletan dari patahan, hal ini dikarenakan pada kecepatan tinggi penetrasi yang dihasilkan tidak cukup sehingga ada kemungkinan menyebabkan adanya cacat porositas, retakan, dan *incomplete fusion* [1][2]. Cacat porositas terlihat pada pengelasan dengan variasi TS 70 mm/menit pada kuat arus 110 A dan 125 A. Adanya cacat berupa *porosity* ini kemungkinan berdampak pada kekuatan tarik lasan yang cenderung menurun [3].

KESIMPULAN

Perubahan kecepatan pengelasan (laju pengelasan) pada proses pengelasan MIG aluminium menunjukkan tren penurunan kekuatan tarik maksimum. Semakin tinggi kecepatan pengelasan, semakin rendah kekuatan tarik yang dihasilkan karena berkurangnya panas yang diberikan, yang memengaruhi penetrasi las dan ikatan logam. Kecepatan pengelasan yang lebih rendah menghasilkan penetrasi yang lebih baik dan kekuatan tarik yang lebih tinggi, tetapi kecepatan yang terlalu lambat dapat menyebabkan panas berlebih dan merusak struktur mikro logam. Selain itu, kecepatan pengelasan yang lebih tinggi menyebabkan fraktur yang cenderung getas dengan cacat seperti porositas, yang juga mengurangi kekuatan tarik. Hasil penelitian ini dapat menjadi acuan dalam penentuan parameter kecepatan pengelasan optimal pada sambungan aluminium di industri manufaktur ringan seperti otomotif dan permesinan. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengeksplorasi penggunaan arus pulsa atau

gas pelindung campuran guna meningkatkan homogenitas mikrostruktur sambungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada P2M Politeknik Negeri Malang yang telah memberikan support dana penelitian, sehingga tulisan ini dapat terwujud.

REFERENSI

- [1] S. Singh, V. Kumar, S. Kumar, and A. Kumar, "Variant of MIG welding of similar and dissimilar metals: A review," *Mater. Today Proc.*, vol. 56, pp. 3550–3555, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.287>.
- [2] L. Shi, C. S. Wu, and X. C. Liu, "Modeling the effects of ultrasonic vibration on friction stir welding," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 222, pp. 91–102, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.03.002>.
- [3] C. Hagenlocher, P. Stritt, R. Weber, and T. Graf, "Strain signatures associated to the formation of hot cracks during laser beam welding of aluminum alloys," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 100, pp. 131–140, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.08.007>.
- [4] M. Mazar Atabaki, M. Nikodinovski, P. Chenier, J. Ma, W. Liu, and R. Kovacevic, "Experimental and numerical investigations of hybrid laser arc welding of aluminum alloys in the thick T-joint configuration," *Opt. Laser Technol.*, vol. 59, pp. 68–92, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2013.12.008>.
- [5] J. Verma and R. V. Taiwade, "Effect of welding processes and conditions on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of duplex stainless steel weldments—A review," *J. Manuf. Process.*, vol. 25, pp. 134–152, Jan. 2017, doi: [10.1016/J.JMAPRO.2016.11.003](https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2016.11.003).
- [6] A. Aoki, S. Tashiro, H. Kurokawa, and M. Tanaka, "Development of novel MIG welding process with duplex current feeding," *J. Manuf. Process.*, vol. 47, pp. 74–82, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.09.009>.
- [7] S. Jaypuria, T. R. Mahapatra, S. Sahoo, and O. Jaypuria, "Effect of arc length trim and adaptive pulsed-MIG process parameters on bead profile of stainless steel with synergic power source," *Mater. Today Proc.*, vol. 26, pp. 787–795, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.027>.
- [8] X. Yang, H. Chen, Z. Zhu, C. Cai, and C. Zhang, "Effect of shielding gas flow on welding process of laser-arc hybrid welding and MIG welding," *J. Manuf. Process.*, vol. 38, pp. 530–542, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.01.045>.
- [9] J. Liu, H. Zhu, Z. Li, W. Cui, and Y. Shi, "Effect of ultrasonic power on porosity, microstructure, mechanical properties of the aluminum alloy joint by ultrasonic assisted laser-MIG hybrid welding," *Opt. Laser Technol.*, vol. 119, p. 105619, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105619>.

- [10] C. Cai, S. He, H. Chen, and W. Zhang, "The influences of Ar-He shielding gas mixture on welding characteristics of fiber laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy," *Opt. Laser Technol.*, vol. 113, pp. 37–45, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.12.011>.
- [11] E. Georgantzia, M. Gkantou, and G. S. Kamaris, "Aluminium alloys as structural material: A review of research," *Eng. Struct.*, vol. 227, p. 111372, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111372>.
- [12] J. HIRSCH, "Recent development in aluminium for automotive applications," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 24, no. 7, pp. 1995–2002, 2014, doi: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63305-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63305-7).
- [13] P. Rambabu, N. Eswara Prasad, V. V Kutumbarao, and R. J. H. Wanhill, "Aluminium Alloys for Aerospace Applications BT - Aerospace Materials and Material Technologies : Volume 1: Aerospace Materials," N. E. Prasad and R. J. H. Wanhill, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2017, pp. 29–52. doi: 10.1007/978-981-10-2134-3_2.
- [14] N. E. Udoeye, A. O. Inegbenebor, and O. S. I. Fayomi, "The Study on Improvement of Aluminium Alloy for Engineering Application: A Review," *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 10, no. 3, pp. 380–385, 2019, [Online]. Available: <http://www.iaeme.com/IJMET/index.asp380http://www.iaeme.com/ijmet/issues.asp?JType=IJMET&VType=10&IType=3http://www.iaeme.com/IJMET/issues.asp?JType=IJMET&VType=10&IType=3>
- [15] D. Varshney and K. Kumar, "Application and use of different aluminium alloys with respect to workability, strength and welding parameter optimization," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 12, no. 1, pp. 1143–1152, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.013>.
- [16] R. D. Ardika, T. Triyono, N. Muhayat, and Triyono, "A review porosity in aluminum welding," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 33, pp. 171–180, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.10.021>.
- [17] P. Li, F. Nie, H. Dong, S. Li, G. Yang, and H. Zhang, "Pulse MIG Welding of 6061-T6/A356-T6 Aluminum Alloy Dissimilar T-joint," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 27, no. 9, pp. 4760–4769, 2018, doi: 10.1007/s11665-018-3528-y.
- [18] L. Huang et al., "Effect of the welding direction on the microstructural characterization in fiber laser-GMAW hybrid welding of 5083 aluminum alloy," *J. Manuf. Process.*, vol. 31, pp. 514–522, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.12.010>.
- [19] S. Yan, C. Ma, and H. Chen, "Modifying microstructures and mechanical properties of laser-arc welded joints of dissimilar advanced aluminum alloys," *Mater. Charact.*, vol. 164, p. 110331, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110331>.
- [20] B. Yang et al., "Influence of ultrasonic peening on microstructure and surface performance of laser-arc hybrid welded 5A06 aluminum alloy joint," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 5, pp. 9576–9587, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.057>.
- [21] A. P. Dewanto, W. Amirudin, and H. Yudo, "Analisa Kekuatan Mekanik Sambungan Las Metode Mig(Metal Inert Gas) Dan Metode Fsw(Friction Stir Welding) 800 Rpm Pada Alumunium Tipe 5083," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 4, no. 3, pp. 613–621, 2016.
- [22] I. N. I. Sihombing, U. Budiaro, and A. F. Zakki, "Pengaruh Posisi Pengelasan dan Bentuk Kampuh Terhadap Kekuatan Tarik dan Mikrografi Sambungan Las Metal Inert Gas (MIG) Pada Aluminium 6061 Sebagai Bahan Material Kapal," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 7, no. 4, p. 303, 2019, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- [23] I. Iswanto, N. Noerdianto, A. Fachruddin, and M. Mulyadi, "Analisa perbandingan kekuatan hasil pengelasan TIG dan pengelasan MIG pada Aluminium 5083," *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 9, no. 1, pp. 87–92, 2020, doi: 10.24127/trb.v9i1.1166.
- [24] K. Witono, T. Machfuroh, S. Sarjiyana, and E. Faizal, "Pengaruh Variasi Travel Speed Terhadap Kekuatan Tarik Pada Pengelasan Disimilar Metal Dengan Mig Robotic Welding," *Otopro*, vol. 19, no. 1, pp. 34–39, 2023, doi: 10.26740/otopro.v19n1.p34-39.