



ANALISA HASIL SAMBUNGAN LAS (PIPA STKM 13B DAN PLAT SPH 440) DENGAN PENGUJIAN TARIK DAN *PHOTOMACRO*

M. Luqman SF^{1a}, Juliyanto Simamora¹, M. Untung Zaenal P¹, Yasya K. P. S¹, M. Zaenudin¹, Sidik Mulyono¹, Askar W¹, I Nyoman J¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Global Jakarta

Korespondensi:

^aProgram Studi Teknik Mesin, Universitas Global Jakarta
luqmanfikri@jgu.ac.id

ABSTRAK

Teknik pengelasan memiliki banyak cara untuk menyatukan antara material. Salah satu teknik pengelasan dengan metode GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) yang memiliki keunggulan : proses pengelasan yang cepat dan dapat digunakan dalam berbagai posisi pengelasan namun memiliki keterbatasan yaitu porositas yang sering terjadi disambungan las. Penelitian bertujuan untuk menganalisa hasil sambungan las pipa STKM13B dan Plat SPD 440 dengan pengujian kuat tarik mengacu ke standar ASTM A370 dan pengamatan struktur makro, dengan Arus 18 dan variasi *voltase* 110, 130, dan 150. Hasil penelitian ini didapatkan bentuk sambungan las dari plat dan pipa yang tersambung sempurna, hasil uji tarik didapatkan nilai *ultimate strength* spesimen 1 (A110/V18), spesimen 2 (A130/V18), spesimen 3 (A150/V18) masing-masing sebesar (18.959, 27.886, 40.005 N) nilai *ultimate strength* tertinggi diperoleh dari spesimen 3(A150/V18) mencapai 40.005 N sedangkan nilai *ultimate strength* terendah diperoleh dari spesimen 1 (A110/V18) mencapai 18.959 N. Terdapat korelasi yang kuat antara arus yang digunakan untuk pengelasan dengan nilai kekuatan tarik maksimum. Hasil pengamatan fotomakro menunjukkan bahwa semakin besar arus, tingkat kerapatan sambungan las semakin maksimal, sehingga porositas berkurang dan nilai kekuatan tarik maksimum meningkat.

Kata kunci: Pengelasan GMAW. Uji Tarik, Uji Optik Makro.

ABSTRACT

GMAW Welding techniques have many ways to be able to unite between materials. One of the welding techniques with the GMAW (Gas Metal Arc Welding) method which has advantages: the welding process is fast and can be used in various welding positions but has limitations, namely porosity that often occurs in welding joints. The research aims to analyse the results of welding joints of STKM13B pipes and SPD 440 plates by testing the tensile strength referring to ASTM A370 standards and observing the macro structure, with a current of 18 and voltage variations of 110, 130, and 150. The results of this study obtained the shape of the welding joint of the plate and pipe which was perfectly connected, the results of the tensile test obtained the ultimate strength value of specimen 1 (A110 / V18), specimen 2 (A130 / V18), specimen 3 (A150 / V18) respectively amounting to (18. 959, 27,886, 40,005 N) the highest ultimate strength value obtained from specimen 3 (A150/V18) reached 40,005 N while the lowest ultimate strength value obtained from specimen 1 (A110/V18) reached 18,959 N. There is a strong correlation between the current used for welding and the maximum tensile strength value. The results of photomacro observations show that the greater the current, the greater the density of the welded joint, so that porosity decreases and the maximum tensile strength value increases.

Keywords: GMAW Welding, Tensile Test, Macro Optical Test.

1. PENDAHULUAN

Ilmu teknik tidak terlepas dari teknologi yang semakin meningkat, hal tersebut ditunjang dari banyaknya proses-proses rekayasa. Proses rekayasa memiliki banyak bagian mulai dari teknik pengukuran, teknik analisa, teknik pembentukan, teknik pemilihan bahan hingga teknik pengelasan. Metode pengelasan dapat digunakan untuk menyambungkan dua bahan yang terbuat dari logam, atau untuk mencairkan sebagian dari logam (1). Pengelasan tidak bisa di pisahkan dalam proses penyambungan logam karena pengelasan mempunyai fungsi yang sangat penting diindustri perancangan komponen kendaraan bermotor (2). Teknik pengelasan terbagi ke sub-sub yang lebih spesifik sesuai dengan metode yang digunakan. Metode pengelasan terbagi : pengelasan cair, pengelasan tekan dan pematrian (3). Pengelasan cair terbagi ke jenis las yaitu las busur, las gas, las listrik terak, las listrik gas, las termit, las sinar elektron dan las busur plasma. Sedangkan pengelasan tekan terbagi ke sub-sub kecil yaitu las resistensi listrik, las tekan gas, las tempa, las gesek, las ledakan, las induksi, las ultrasonik. Kemudian metode pematrian terbagi ke 2 sub kecil pembrasingan dan penyolderan (3). Jenis-jenis metode tersebut tidak terlepas dari nilai keunggulan dan nilai kekurangannya. Pengelasan GMAW (*gas metal arc welding*) memiliki efektifitas proses yang tinggi, biaya produksi yang terjangkau, nilai produktifitas tinggi dan hasil produk yang maksimal (4). Pengelasan GMAW terdapat fenomena dan proses fisik yang rumit berkembang karena pemanasan/pelelehan dan pendinginan/pemadatan selama pengelasan lembaran logam. Oleh karena itu, karakteristik makro-struktural dan mekanik dari logam dasar dan las mungkin berbeda berdampak negatif (5).

Sejumlah penelitian telah dilakukan untuk memantau, memprediksikan, atau mengendalikan operasi pengelasan meminimalkan konsekuensi negatif dan mencapai hasil yang diinginkan (6). Secara khusus, arus dan tegangan busur merupakan variabel kontrol yang menonjol untuk mode transfer logam, karakteristik metalurgi las, cacat las dan stabilitas las (7). Masalah yang terjadi dalam pengelasan GMAW adalah porositas(8). Penelitian uji tarik dan makrografi pada bahan pengelasan aluminium 2024 T42 dengan variasi ketebalan 0,5+1,2+0,6 mm, 0,8+0,6+1,1 mm, dan 0,8+2,2+1,2 mm menunjukkan bahwa setiap variasi kedalaman memenuhi standar AWS D17.2 dengan nilai lebih dari 140 lbf (9). Dalam penelitian ini, GMAW *welding* berdampak pada *ultimate strength* pada spesimen baja ASTM A36 rendah karbon dengan kadar karbon 90A dengan nilai 327.21 MPa dan 110A dengan nilai 354.18 MPa adalah yang paling rendah (10). Metode pengujian kekerasan untuk pengelasan GMAW terhadap baja ASTM A 36 dengan sudut V 60 derajat menunjukkan nilai kekuatan maksimal dengan varian 80, 100 dan 120 amper. Arus 80 memiliki nilai kekuatan kekerasan 65,60 Hrc, dan arus 100 ampere memiliki nilai kekerasan 80,40Hrc (11). Studi ini menguji kekuatan tarik dan kekerasan pada sambungan las plat baja ST60 tebal 6 mm dengan pengelasan GMAW arus 90, 100, dan 110 Ampere diperoleh rata-rata hasil uji 333,2 HV, 464,1 HV, dan 558,1 HV. Kemudian pada pengujian tarik, arus 90, 100, dan 110 Ampere diperoleh rata-rata hasil uji 418,3 MPa, 545,5 MPa, dan 633,3 MPa. Dari hasil yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi arus pengelasan yang dipakai, maka semakin tinggi nilai kekerasan dan kekuatan tarik pada baja ST 60.

Dengan memahami karakteristik sambungan las antara pipa STKM 13B dan plat SPH 440, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan teknik pengelasan yang lebih efisien dan dapat diandalkan untuk aplikasi industri yang beragam. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa hasil sambungan las antara pipa STKM 13B dan plat SPH 440 dengan menggunakan dua metode pengujian utama, yaitu pengujian tarik dan analisis *photomacro*. Pipa STKM 13B, yang sering digunakan dalam industri minyak dan gas, memiliki sifat mekanis yang unggul, sementara plat SPH 440 memiliki kekuatan yang tinggi dan ketahanan yang baik terhadap korosi.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Material dan Persiapan Spesimen Uji

Material yang digunakan dalam penelitian ini yaitu Plat SPH440 dan Pipa STKM 13B dengan spesifikasi sebagai berikut :

2.1.1 Plat SPH440

Material Plat SPH440 T3.2 atau *Toyota Hot Rolled Steel Coil standart* JIS G3113 merupakan baja dengan kandungan karbon (C) 0,102%, Silikon (Si) 0,08%, Mangan (Mn) 1.10%, Fosfor (P) 0,012, Sulfur (S) 0,003 dan merupakan material yang digunakan dalam proses pengelasan serta material yang cukup baik

digunakan untuk beban Dinamis sehingga banyak di gunakan pada industri otomotif (12). Plat SPH 440 yang selanjutnya di buat spesimen uji ukuran (3.5 cm x 10 cm x 0.32 cm) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Plat SPH 440

2.1.2 Pipa STKM 13B

Material pipa STKM13B standar JISG3445 adalah baja yang memiliki kandungan karbon (C) sebesar 0.072, silikon (Si) sebesar 0.008, mangan (Mn) sebesar 0.793, fosfor (P) sebesar 0.014, dan sulfur (S) sebesar 0.004. Baja ini banyak digunakan dalam industri otomotif karena kekuatannya terhadap beban dinamis (13). Gambar 2 menunjukkan material pipa STKM13B dengan diameter 2.86 cm, tebal 0.23 cm, dan panjang 10 cm.



Gambar 2. Pipa STKM13B.

2.2 Proses Pengelasan



Gambar 3. Lengan Robot OTC-DAIHEN Tipe Almega II-V6

Pelaksanaan proses pengelasan sesuai dengan parameter yang telah ditentukan, guna memastikan integritas sambungan dan kualitas selama proses, pengelasan dilakukan menggunakan lengan robot OTC-DAIHEN Tipe Almega II-V6 sebagaimana terlihat pada Gambar 3. Lengan robot yang digunakan dilengkapi dengan 6 sumbu derajat kebebasan, memungkinkan untuk melakukan pengelasan pada sudut yang telah ditentukan dengan akurasi dan konsistensi yang tinggi.

Material pipa dan plat kemudian ditempatkan pada sebuah *welding jig* yang dirancang khusus untuk tujuan ini, sebagaimana yang dapat dilihat pada Gambar 4. Langkah ini diambil untuk meminimalisir pergerakan benda selama proses pengelasan, memastikan bahwa sambungan las terbentuk dengan presisi dan kekokohan yang optimal. Dengan demikian, penggunaan robot dan penggunaan *welding jig* secara bersama-sama membantu menjamin hasil pengelasan yang berkualitas dan konsisten pada pipa plat SPH 440 dan STKM 13B.



Gambar 4 *Welding Jig* untuk pengelasan pipa dan plat.

2.3 Pengujian

2.3.1 Pengujian Tarik

Uji tarik merupakan suatu metode yang digunakan untuk menguji kekuatan suatu material dengan memberikan beban gaya searah sumbu. Data yang dihasilkan dari pengujian tarik memiliki signifikansi besar dalam rekayasa teknik dan desain produk karena memberikan informasi mengenai kekuatan material. Pengujian uji tarik berguna untuk menilai ketahanan suatu material terhadap gaya statis yang diberikan secara perlahan. Salah satu pendekatan untuk memahami sifat mekanik dari logam adalah melalui uji tarik, yang dapat mengungkapkan kekuatan dan elastisitas logam tersebut (14).

2.3.2 Pengujian Photomacro.

Pada penelitian ini, pengujian *photomacro* dilakukan untuk mengevaluasi sambungan hasil las dengan memeriksa jarak garis gabungan (*fusion line*) di bawah permukaan logam yang telah disambung menggunakan las, yang umumnya dikenal sebagai *welding penetration*. *Fusion line* merupakan *interface* antara logam lasan dan HAZ. Kedalaman penetrasi yang bermasalah pada proses pengelasan seringkali sulit terdeteksi karena sifat yang sangat reflektif dari *alloy* pengelasan, ditambah lagi variasi ukuran sampel yang membuatnya sulit diletakkan di *stage* makroskop konvensional. Penggunaan makroskop memungkinkan pengukuran yang akurat pada sambungan las, dengan adanya *filter* polarisasi untuk mengurangi efek reflektif pada *alloy* pengelasan, menjadikannya pilihan utama dalam industri pengelasan saat ini (15). Rincian skema pengujian *photomacro* terdapat pada Gambar 5.

T1 : Tebal material tertipis (t_{min})

T2 : Tebal material tertebal (t_{max})

A1 : Kedalaman pengelasan T1

A2: Kedalaman pengelasan T2

B1 : Panjang pengelasan T1

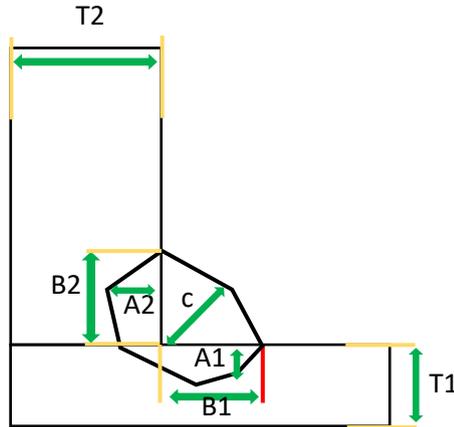
B2: Panjang pengelasan T2

C : Tinggi pengelasan

L : Panjang pengelasan

Gap antara material jika ditemukan lebar gap max: 0.8mm

Spesifikasi A1, A2 \geq 20% t_{min} B1, B2 \geq 90% t_{min} C \geq 70% t_{min}



Gambar 5. Skema pengujian *photomacro*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 6. Hasil Las GMAW material STKM13B dengan Plat SPH440.

Hasil pengujian kuat tarik dan *photomacro* sambungan bahan pipa STKM13B dengan Plat SPH440, di buat dengan jumlah 18 spesimen dan masing-masing spesimen akan dilakukan pengujian yang terbagi 9 spesimen untuk uji tarik dan 9 spesimen untuk uji *photomacro*. Gambar 3 menunjukkan spesimen-spesimen uji secara keseluruhan, sedangkan Gambar 7 merupakan hasil pengamatan makroskopik (*photomacro*) pada salah satu spesimen secara lebih detail. Pengamatan makroskopik dengan garis bantu membantu dalam melakukan analisis terhadap struktur dan kualitas sambungan las secara lebih mendalam.

Hasil analisa tertera pada Tabel 1 penggabungan parameter *welding robot* GMAW menunjukkan hasil pengujian tarik yang dilakukan pada tiga spesimen las yang berbeda. Spesimen-spesimen tersebut dibedakan oleh parameter pengelasan yang digunakan, terutama arus (A) dan *voltase* (V). Spesimen 1 (A110/V18): Parameter pengelasan yang digunakan adalah arus 110 A dan *voltase* 18 V. Kekuatan tarik maksimum (*ultimate strength*) yang diperoleh adalah 18.959 N. Elongasi (perpanjangan) setelah pengujian tarik adalah 5 mm. Spesimen 2 (A130/V18): Parameter pengelasan yang digunakan adalah arus 130 A dan *voltase* 18 V. Kekuatan tarik maksimum (*ultimate strength*) yang diperoleh adalah 27.886 N. Elongasi (perpanjangan) setelah pengujian tarik adalah 4.2 mm. Spesimen 3 (A150/V18): Parameter pengelasan yang digunakan adalah arus 150 A dan *voltase* 18 V. Kekuatan tarik maksimum (*ultimate strength*) yang diperoleh adalah 40.005 N. Elongasi (perpanjangan) setelah pengujian tarik adalah 8 mm.

Dari data tersebut, dapat dilihat bahwa terdapat korelasi antara arus pengelasan yang digunakan dengan kekuatan tarik maksimum (*ultimate strength*) dan elongasi yang diperoleh. Semakin besar arus pengelasan, kekuatan tarik maksimum dan elongasi cenderung meningkat. Spesimen 3 (A150/V18) memiliki kekuatan tarik maksimum tertinggi sebesar 40.005 N dan elongasi terbesar yaitu 8 mm. Sedangkan spesimen 1 (A110/V18) memiliki kekuatan tarik maksimum terendah sebesar 18.959 N dan elongasi terkecil yaitu 5 mm. Namun, perlu diingat bahwa selain arus, parameter lain seperti *voltase*, kecepatan pengelasan, jenis logam, dan teknik pengelasan juga dapat mempengaruhi sifat mekanik hasil las, termasuk kekuatan tarik dan elongasi.



Gambar 7. Hasil *photomacro*.

Tabel 1. Hasil uji tarik

<i>Spesimen</i>	<i>Parameter</i>	<i>Ultimate strength (N)</i>	<i>Elongasi (mm)</i>
1.	A110/V18	18.959	5
2.	A130/V18	27.886	4.2
3.	A150/V18	40.005	8

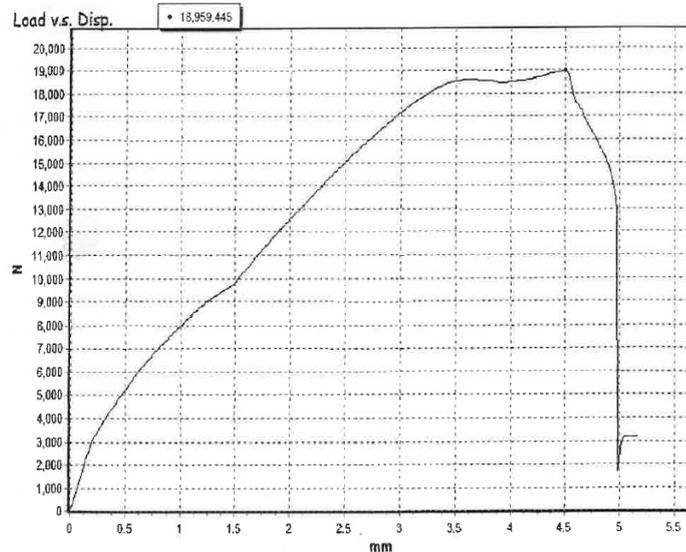


Gambar 8. Hasil *Cutting Halus* GMAW STKM13B Dan Plat SPH440.

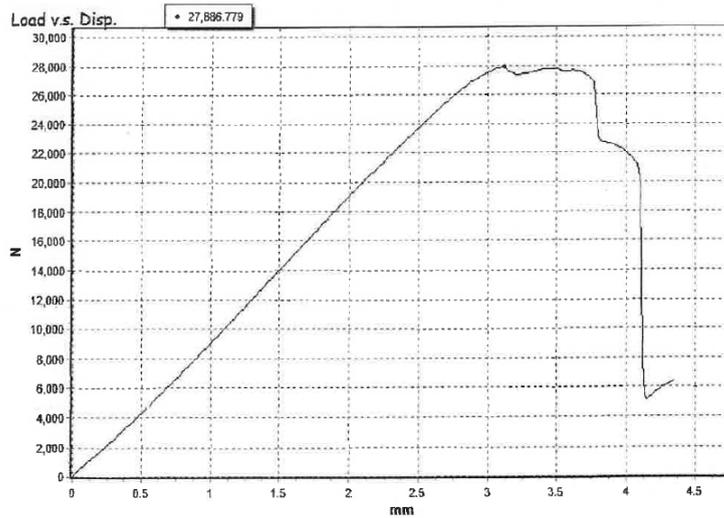


Gambar 9. Hasil Poles GMAW STKM13B dan Plat SPH440

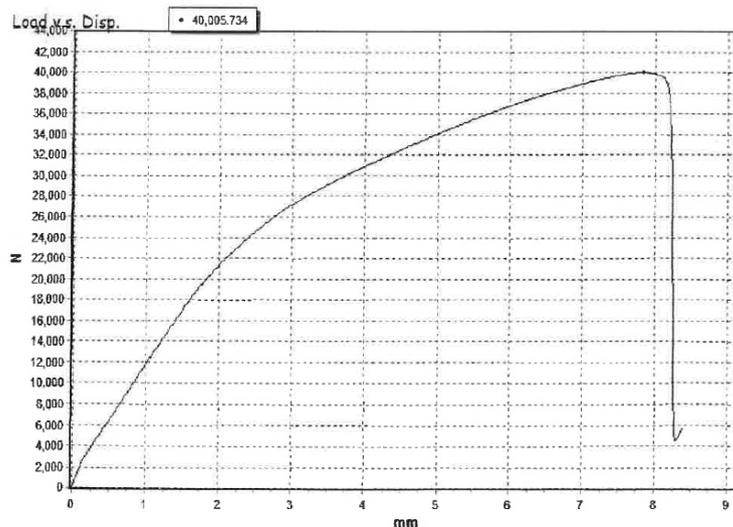
Pada Gambar 9 menunjukkan kedua spesimen berbentuk silinder atau tabung kecil, merupakan potongan melintang dari hasil pengelasan. Permukaan spesimen terlihat sangat halus dan mengkilap, menunjukkan proses pemolesan yang baik telah dilakukan. Bagian dalam spesimen berwarna gelap, menunjukkan area lasan atau zona terpengaruh panas. Bagian luar dan tepi spesimen berwarna perak metalik, menunjukkan logam dasar yang tidak terpengaruh proses pengelasan. Kedua spesimen tampak serupa, yang menunjukkan konsistensi dalam proses pengelasan dan pemolesan. Spesimen ini hasil dari pengelasan GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) menggunakan bahan STKM13B (pipa baja) dan Plat SPH440 (plat baja). Hasil pemolesan yang baik dapat dilakukan analisis lebih lanjut terhadap kualitas lasan, seperti memeriksa fusi, penetrasi, dan struktur mikro di daerah lasan.



Gambar 10. Hasil uji kuat tarik sambunga las dengan voltase A110/V 18.



Gambar 11. Hasil uji kuat tarik sambungan las dengan *voltase* A130/V18.



Gambar 12. Hasil uji kuat tarik sambungan las dengan *voltase* A150/V18.

Pada gambar 10, 11, dan 12 terlihat grafik kekuatan tarik dari sambungan las dengan variasi *voltase*. Variasi arus berpengaruh terhadap nilai kekuatan tarik maksimum (*ultimate strength*) spesimen las. Spesimen 1 (A110/V180) memiliki nilai *ultimate strength* terendah sebesar 18,959 N, sedangkan spesimen 3 (A150/V180) memiliki nilai *ultimate strength* tertinggi sebesar 40,005 N. Hal ini menunjukkan adanya korelasi yang kuat antara arus yang digunakan untuk pengelasan dengan nilai kekuatan tarik maksimum. Peningkatan arus pengelasan menyebabkan masukan panas yang lebih besar pada logam las, sehingga mencapai tingkat kerapatan yang maksimal. Hasil pengamatan foto makro pada gambar 13, 14, dan 15 menunjukkan bahwa semakin besar arus pengelasan, tingkat porositas pada sambungan las semakin berkurang. Porositas yang rendah menghasilkan sambungan las yang lebih padat dan kontinyu, sehingga meningkatkan kekuatan tarik maksimum. Selain itu, masukan panas yang lebih besar juga mempengaruhi struktur makro logam las. Gambar 16, 17, dan 18 menunjukkan perubahan struktur makro pada variasi arus yang berbeda. Pada arus yang lebih tinggi, terbentuk ukuran butir yang lebih halus dan homogen, serta fasa yang lebih stabil. Struktur makro yang lebih baik ini berkontribusi pada peningkatan sifat mekanik, seperti kekuatan tarik maksimum dan keuletan sambungan las.

Dengan demikian, variasi arus yang digunakan dalam pengelasan GMAW berpengaruh signifikan terhadap karakteristik sambungan las, baik dari segi kerapatan, tingkat porositas, struktur makro, maupun sifat mekanik, khususnya kekuatan tarik maksimum. Peningkatan arus pengelasan menghasilkan sambungan las yang lebih padat dengan porositas yang rendah, struktur makro yang lebih baik, serta kekuatan tarik maksimum yang lebih tinggi.

Tabel 2. Nilai hasil foto makro.

<i>Spesimen</i>	<i>Parameter</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>A1 (Pipa)</i>	<i>A2 (Plat)</i>	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>C</i>	<i>L</i>
1.	A110/V18	2.30	3.20	1.15	1.32	3.27	3.28	2.86	28
2.	A130/V18	2.30	3.20	1.69	1.81	3.54	3.46	3.42	28
3.	A150/V18	2.30	3.20	0.91	1.59	3.43	3.93	4.05	28

Catatan:

T1 : Tebal material tertipis (tmin)

T2 : Tebal material tertebal (tmax)

B1 : Panjang lasan t1

B2 : Panjang lasan t2

C : Tinggi lasan

L : Panjang lasan

4. KESIMPULAN

Penelitian ini memberikan kesimpulan bahwa ada korelasi yang kuat antara arus yang digunakan untuk pengelasan dengan nilai *ultimate strength* dan hasil *photomacro*, semakin besar arus maka, menghasilkan tingkat kerapatan yg maksimal kemudian berpengaruh pada minimnya porositas dan meningkatkan nilai *ultimate strength*. Hasil pengujian tarik didapatkan nilai *ultimate strength* spesimen 1 (A110/V18), spesimen 2 (A130/V18), spesimen 3 (A150/V18) masing-masing sebesar (18.959, 27.886, 40.005 N) nilai *ultimate strength* tertinggi diperoleh dari spesimen 3 (A150/V18) sedangkan nilai *ultimate strength* terendah diperoleh dari spesimen 1 (A110/V18).

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Universitas Global Jakarta atas dukungannya dalam bentuk fasilitas dan pendanaan dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- 1 B. Sulistiyo and H. Purwanto, "Analisis Pengaruh Arus Pengelasan GMAW ...," Apr. 2021.
- 2 S. Nurhaji, H. Abizar, H. Abdillah, and S. Deni Ramdani, "Model pembelajaran conversation analysis and variation theory approach (CAVTA) pada pembelajaran pengelasan smaw posisi 1f," vol. 11, no. 1, pp. 51–66, 2020, doi: 10.30738/jtv.v11i1.11131.
- 3 H. Wiryosumarto, *Teknologi Pengelasan*, 8th ed. Jakarta: PT. Pradnya Paramita, 2000.
- 4 N. Moslemi, N. Redzuan, N. Ahmad, and T. N. Hor, "Effect of current on characteristic for 316 stainless steel welded joint including microstructure and mechanical properties," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2015, pp. 560–564. doi: 10.1016/j.procir.2015.01.010.
- 5 P. Kah, P. Layus, E. Hiltunen, and J. Martikainen, "Real-time weld process monitoring," in *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publications, 2014, pp. 117–124. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.933.117.
- 6 R. Thompson Martínez, G. Alvarez Bestard, A. Martins Almeida Silva, and S. C. Absi Alfaro, "Analysis of GMAW process with deep learning and machine learning techniques," *J Manuf Process*, vol. 62, pp. 695–703, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.12.052.
- 7 M. Mousavi Anzehaee and M. Haeri, "Welding current and arc voltage control in a GMAW process using ARMarkov based MPC," *Control Eng Pract*, vol. 19, no. 12, pp. 1408–1422, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.conengprac.2011.07.015.

- 8 J. Simamora, A. Gamayel, I. Bagus Indra, and M. Zaenudin, "Pengaruh pengaturan voltase terhadap kekuatan tarik pada gas metal arc welding antara pipa STKM 13B dan pelat SPH 440," *JTTM : Jurnal Terapan Teknik Mesin*, vol. 4, no. 1, pp. 83–89, Apr. 2023, doi: 10.37373/jttm.v4i1.470.
- 9 Heni Hendaryati, M. Mamungkas, Iis Siti Aisyah, and Muhammad Hasbi Rusmana, "The effect of variations in thickness of 2024 T42 aluminum plate on tensile strength and macrography in the process of resistance spot welding," *JTTM : Jurnal Terapan Teknik Mesin*, vol. 3, no. 2, pp. 96–107, Oct. 2022, doi: 10.37373/jttm.v3i2.299.
- 10 Juwanda, Saifuddin, and Marzuki, "Analisa pengaruh kuat arus hasil pengelasan GMAW terhadap kekerasan material ASTM A 36," 2021.
- 11 S. S. M. H. Pratama AL, "Pengaruh Variasi Arus pada Pengelasan GMAW ...," *Momentum*, vol. 17, pp. 43–46, 2021, (Online). Available: <https://doi.org/10.1520/E0008>
- 12 N. A. Kamal Bashah *et al.*, "Multi-regression modeling for springback effect on automotive body in white stamped parts," *Mater Des*, vol. 46, pp. 175–190, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.10.006.
- 13 Z. Zhang, C. Ru, and Q. Li, "Study on a novel field-measured load calibration method for the life assessment of the metro bogie frame," *Eng Fail Anal*, vol. 136, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106209.
- 14 R. D. Callister WD, *Materials Science and Engineering An Introduction 10th Edition*. Hachette Livre - Département Pratique, 2018.
- 15 Kou S, *Welding Metallurgy Second Edition*. 2002.