

Artikel Penelitian (Teknik Mesin)

Pengaruh Heat Input Pengelasan GTAW terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Pipa SS 304

Ahmad Furqon Ramadhani *, Viktor Naubnome, Farradina Choria Suci

Fakultas Teknik, Teknik Mesin, Universitas Singaperbangsa Karawang, Karawang, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 18 April 2026
Revisi Akhir: 25 Juli 2026
Diterbitkan Online: 31 Juli 2026

KATA KUNCI

GTAW
Heat Input
Kekuatan Tarik
SS 304
Struktur Mikro

KORESPONDENSI (*)

E-mail: 2110631150065@student.unsika.ac.id

A B S T R A K

Penelitian ini menganalisis pengaruh tiga kondisi parameter Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pipa Stainless Steel 304. Pengelasan posisi 1G menggunakan arus 55 A, 60 A, dan 65 A, kecepatan 6 cm/menit, filler ER308, serta gas pelindung argon. Berdasarkan setting tegangan mesin 90 V, ketiga kondisi diberi kode heat input nominal 49,5 kJ/cm, 54,0 kJ/cm, dan 58,5 kJ/cm; nilai tersebut belum merepresentasikan heat input bersih karena tegangan busur aktual dan efisiensi termal tidak direkam. Pengujian meliputi kekerasan Vickers pada weld metal (WM), heat-affected zone (HAZ), dan base metal (BM), uji tarik tiga replikasi per kondisi, serta metalografi 200 $\times$. Kekerasan HAZ menurun dari 165,3 HV menjadi 162,6 HV dan 158,3 HV seiring peningkatan kondisi arus. Rerata kekuatan tarik berturut-turut sebesar 634 MPa, 592 MPa, dan 596 MPa, sedangkan regangan menurun dari 40,0% menjadi 36,3% dan 34,6%. Citra mikro memperlihatkan perbedaan morfologi solidifikasi pada WM dan kecenderungan pengasaran fitur mikro pada HAZ, sementara BM relatif stabil. Kondisi 55 A memberikan kombinasi kekuatan tarik, regangan, dan kekerasan HAZ terbaik di antara kondisi yang diuji, tetapi penetapan heat input optimum memerlukan pengukuran tegangan busur aktual.

PENDAHULUAN

Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) banyak digunakan untuk penyambungan baja tahan karat austenitik karena memberikan kendali busur yang baik, daerah las yang bersih, dan kualitas sambungan yang relatif tinggi [1]. Pada SS 304, perubahan arus dan parameter pengelasan dapat memengaruhi kekuatan tarik, kekerasan, serta morfologi struktur mikro di weld metal dan heat-affected zone (HAZ) [2]. Penelitian orbital pulse-current GTAW pada pipa AISI 304L juga menunjukkan bahwa parameter arus pulsa dan posisi pengelasan memengaruhi geometri las, mikrostruktur, serta sifat mekanik sambungan [3].

Besarnya energi termal yang masuk ke sambungan ditentukan oleh arus, tegangan busur, kecepatan pengelasan, dan efisiensi proses. Perubahan parameter tersebut memengaruhi laju pemanasan dan pendinginan, lebar HAZ, serta perkembangan butir. Penelitian pada sambungan las menunjukkan bahwa peningkatan parameter termal dapat mengubah sifat mekanik hasil pengelasan [4]. Pada sambungan dissimilar AISI 1045 dengan SS 304, variasi heat input juga dilaporkan memengaruhi daerah HAZ, fusion line, dan distribusi kekerasan [5]. Tinjauan proses GTAW menunjukkan bahwa siklus termal dapat membentuk fitur mikro yang lebih kasar pada weld zone dan HAZ serta memengaruhi sifat mekanik sambungan [6].

Kajian terkini pada baja tahan karat austenitik SS 304 menunjukkan bahwa variasi arus dan kondisi proses GTAW berkaitan dengan perubahan kekerasan dan struktur mikro sambungan [7]. Penelitian lain juga melaporkan bahwa

perubahan arus GTAW menghasilkan perbedaan kekuatan tarik pada material hasil pengelasan [8]. Eksperimen TIG pada SS 304L menunjukkan bahwa peningkatan arus dapat meningkatkan kekuatan tarik dan regangan, tetapi menurunkan kekerasan sambungan [9]. Pada baja tahan karat austenitik AISI 321, heat input dilaporkan sebagai faktor dominan yang memengaruhi sifat sambungan PC-GTAW [10]. Secara umum, parameter pengelasan harus dikendalikan karena perubahan masukan panas dapat menghasilkan respons mekanik yang berbeda pada weld metal, HAZ, dan base metal [11].

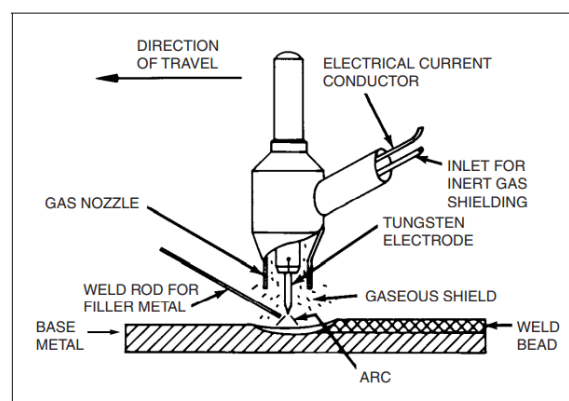
Meskipun penelitian terdahulu telah membahas pengaruh arus, jenis fluks, bentuk kampuh, atau kombinasi proses pengelasan, kajian yang secara bersamaan mengevaluasi kekuatan tarik, distribusi kekerasan pada tiga zona, dan struktur mikro pipa SS 304 pada variasi heat input masih terbatas. Selain itu, validitas nilai heat input sangat bergantung pada penggunaan tegangan busur aktual selama busur menyala, bukan tegangan tanpa beban mesin.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh tiga kondisi parameter GTAW terhadap kekuatan tarik, kekerasan Vickers, dan struktur mikro pipa SS 304. Pengujian kekerasan mikro mengikuti prinsip ASTM E384 [12]. Pengujian tarik mengacu pada ASTM E8/E8M [13]. Kebaruan penelitian terletak pada evaluasi terpadu tiga respons tersebut pada WM, HAZ, dan BM menggunakan tiga tingkat arus dengan kecepatan pengelasan tetap. Karena dokumen eksperimen hanya mencatat setting tegangan mesin, kajian ini juga membedakan secara tegas antara kode heat input nominal dan heat input bersih agar interpretasi hubungan parameter proses dan sifat material tetap transparan. Pengelolaan mutu sambungan las memerlukan pengendalian prosedur, personel, inspeksi, dan dokumentasi secara terpadu [14]. Pendekatan manufaktur pengelasan modern menekankan pentingnya pemilihan parameter, pemodelan, penginderaan, dan pengendalian proses untuk menjaga mutu sambungan [15].

TINJAUAN PUSTAKA

GTAW pada Stainless Steel 304

GTAW menggunakan elektroda tungsten tidak terkonsumsi untuk membentuk busur listrik, sedangkan argon berfungsi melindungi kolam las dari kontaminasi atmosfer. Pada pengelasan SS 304 dengan logam pengisi ER308L, kualitas sambungan ditentukan oleh kestabilan busur, perlindungan gas, geometri kampuh, arus, tegangan busur, dan kecepatan gerak. Perubahan parameter tersebut dapat memengaruhi penetrasi, bentuk manik las, dan sifat mekanik sambungan. Variasi laju aliran gas pelindung pada pengelasan TIG SS 304 juga terbukti mengubah kekuatan tarik, regangan, dan kekerasan sambungan.



Gambar 1. Skema Proses Pengelasan GTAW

Sumber: Dokumentasi sekunder pada naskah awal.

Heat Input dan Respons Termal Sambungan

Heat input menyatakan energi panas per satuan panjang sambungan. Untuk kecepatan pengelasan yang dinyatakan dalam cm/menit, heat input dapat dihitung menggunakan Persamaan (1). Tegangan yang digunakan harus berupa tegangan busur aktual ketika proses pengelasan berlangsung. Nilai open-circuit voltage hanya menggambarkan tegangan mesin sebelum busur terbentuk dan tidak mewakili energi yang benar-benar masuk ke benda kerja.

$$HI = \eta \times V \times I \times 60 / v \quad (1)$$

dengan HI adalah heat input (J/cm), η adalah efisiensi termal proses, V adalah tegangan busur aktual (V), I adalah arus pengelasan (A), dan v adalah kecepatan pengelasan (cm/menit). Jika efisiensi proses tidak diterapkan, nilai yang diperoleh harus disebut sebagai gross arc energy, bukan heat input efektif.

Peningkatan energi per satuan panjang memperpanjang waktu material berada pada temperatur tinggi dan cenderung memperlebar HAZ. Pada baja tahan karat austenitik, perubahan siklus termal dapat memengaruhi ukuran butir austenit, distribusi delta ferrite pada weld metal, dan potensi sensitization. Tinjauan terhadap proses GTAW pada baja tahan karat melaporkan bahwa siklus termal dapat membentuk butir kasar di weld zone dan HAZ serta memengaruhi kekuatan tarik dan kekerasan. Oleh karena itu, interpretasi struktur mikro harus didasarkan pada foto mikro asli dengan pembesaran dan skala yang seragam, bukan hanya uraian definisi zona.

METODOLOGI

Material dan Proses Pengelasan

Penelitian dilaksanakan pada Juni-Juli 2025 di Laboratorium Pengelasan Fakultas Teknik Universitas Singaperbangsa Karawang. Material yang digunakan adalah pipa SS 304 berdiameter sekitar 3,9 inci dengan ketebalan 3 mm. Sambungan dibuat sebagai single-V butt joint pada posisi 1G menggunakan proses GTAW manual, filler ER308 berdiameter 1,8 mm, gas pelindung argon, dan temperatur interpass maksimum 200 °C. Tiga kondisi arus yang digunakan adalah 55 A, 60 A, dan 65 A pada kecepatan gerak 6 cm/menit.

Tabel 1. Parameter Pengelasan dan Kode Heat Input Nominal

Kondisi	Arus (A)	Kecepatan (cm/menit)	Setting tegangan (V)	Kode HI nominal (kJ/cm)	Status validasi
A	55	6	90	49,5	Tegangan busur aktual tidak direkam
B	60	6	90	54,0	Tegangan busur aktual tidak direkam
C	65	6	90	58,5	Tegangan busur aktual tidak direkam

Sumber: WPS dan data penelitian.

Kode heat input nominal dihitung menggunakan $HI = V \times I \times 60 / v$ dengan setting tegangan 90 V dan tanpa faktor efisiensi. Namun, nilai 90 V pada dokumen sumber belum dapat dipastikan sebagai tegangan busur saat pengelasan. Oleh karena itu, nilai 49,5-58,5 kJ/cm digunakan sebagai kode kondisi eksperimen, bukan sebagai heat input bersih yang telah tervalidasi. Pengukuran tegangan busur di bawah beban dan pencantuman efisiensi termal diperlukan untuk memperoleh heat input efektif.

Pengujian Mekanik dan Metalografi

Pengujian kekerasan mikro Vickers dilakukan pada tiga zona, yaitu weld metal (WM), heat-affected zone (HAZ), dan base metal (BM). Setiap zona diuji pada tiga titik dengan beban 5 kgf (49,03 N) dan waktu penahanan 10 detik sesuai prinsip ASTM E384. Nilai yang dilaporkan merupakan rerata tiga indentasi untuk setiap zona dan kondisi.

Pengujian tarik dilakukan terhadap tiga spesimen pada setiap kondisi untuk memperoleh beban maksimum, ultimate tensile strength (UTS), regangan, dan lokasi patahan. Spesimen disiapkan dari hasil sambungan pipa dan diuji menggunakan prosedur laboratorium yang mengacu pada ASTM E8/E8M. Data individual dan rerata dilaporkan agar variasi antarreplikasi dapat dievaluasi.



Gambar 2. Spesimen Uji Tarik untuk Tiga Kondisi Arus Pengelasan

Sumber: Dokumentasi penelitian.

Pengamatan metalografi dilakukan pada WM, HAZ, dan BM dengan pembesaran $200\times$. Setiap kondisi diwakili satu spesimen metalografi. Citra asli memuat scale bar $50\text{ }\mu\text{m}$. Dokumen sumber tidak mencantumkan jenis dan durasi etsa, sehingga identifikasi fasa dibatasi pada interpretasi morfologi optik dan tidak digunakan sebagai verifikasi fasa kuantitatif.

Keterbatasan metode metalografi adalah tidak tersedianya informasi larutan etsa dan pengukuran ukuran butir. Oleh sebab itu, pembahasan difokuskan pada perbandingan visual morfologi, bukan penetapan fraksi fasa atau ukuran butir absolut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Visualisasi Sambungan Las



Gambar 3. Hasil pengelasan GTAW pada Arus 55 A, 60 A, dan 65 A

Sumber: Dokumentasi penelitian

Pengamatan visual menunjukkan bahwa ketiga sambungan membentuk manik las yang kontinu. Tidak terlihat overlap yang dominan pada foto makro. Namun, penilaian visual tidak dapat menggantikan pemeriksaan cacat internal; oleh sebab itu, pernyataan bebas cacat harus dibatasi pada cacat permukaan yang terlihat pada dokumentasi. Pengelolaan mutu sambungan las memerlukan pengendalian prosedur, personel, inspeksi, dan dokumentasi secara terpadu. Perbedaan lebar perubahan warna termal di sekitar sambungan mengindikasikan adanya variasi paparan panas, tetapi interpretasi kuantitatif memerlukan parameter busur aktual.

Hasil Uji Kekerasan Vickers

Tabel 2. Rekapitulasi Kekerasan Vickers pada Setiap Zona

Kondisi parameter	WM (HV)	HAZ (HV)	BM (HV)
A: 55 A / label awal 49.500 J/cm	168,0	165,3	163,0
B: 60 A / label awal 54.000 J/cm	163,3	162,6	161,6
C: 65 A / label awal 58.500 J/cm	163,3	158,3	168,3

Sumber: Data penelitian, diolah.

Kekerasan HAZ menurun secara konsisten dari 165,3 HV pada kondisi A menjadi 162,6 HV pada kondisi B dan 158,3 HV pada kondisi C. Penurunan dari kondisi A ke C mencapai sekitar 4,2%. Kekerasan WM juga turun dari 168,0 HV menjadi 163,3 HV dan kemudian relatif tetap. Kecenderungan ini mengindikasikan bahwa peningkatan paparan termal pada kecepatan gerak tetap berkaitan dengan pelunakan lokal di WM dan HAZ, yang dapat dipengaruhi oleh pertumbuhan fitur mikro dan penurunan laju pendinginan.

Nilai BM tidak menunjukkan tren yang sama, yaitu 163,0 HV, 161,6 HV, dan 168,3 HV. Karena BM berada di luar daerah pengaruh panas utama, variasi tersebut lebih mungkin dipengaruhi oleh heterogenitas lokal, posisi indentasi, dan keterbatasan jumlah titik uji. Dengan demikian, interpretasi pengaruh parameter pengelasan terutama didasarkan pada perubahan WM dan HAZ.

Hasil Uji Tarik

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Uji Tarik Tiga Replikasi

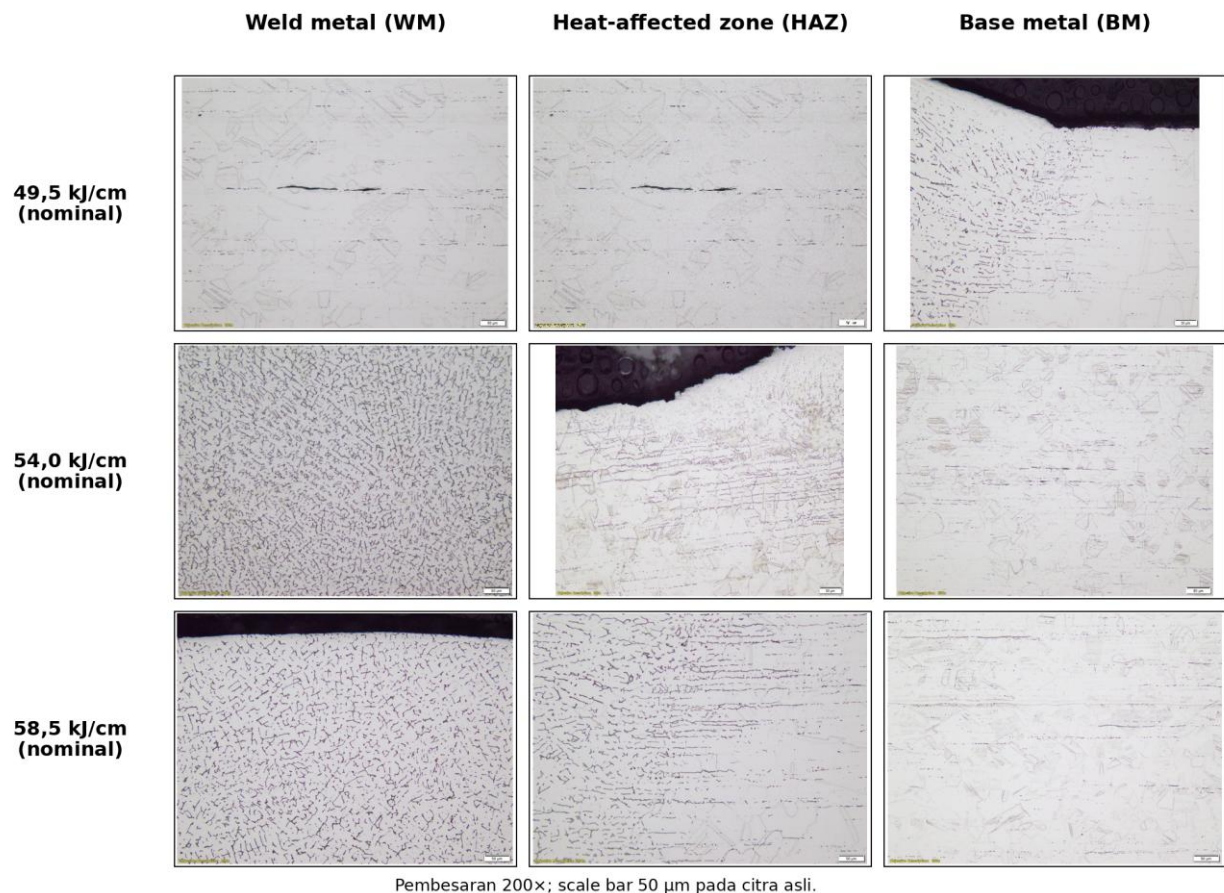
Kondisi parameter	UTS individual; rerata (MPa)	Regangan rerata (%)	Lokasi patahan
A: 55 A / HI nominal 49,5 kJ/cm	632; 630; 640,2; rerata 634	40,0	Base metal (3/3)
B: 60 A / HI nominal 54,0 kJ/cm	585; 594; 597; rerata 592	36,3	Material; lokasi rinci tidak dicantumkan
C: 65 A / HI nominal 58,5 kJ/cm	629; 582; 576; rerata 596	34,6	Base metal (3/3)

Sumber: Data uji tarik pada laporan tugas akhir, diolah.

Rerata UTS tertinggi diperoleh pada kondisi A sebesar 634 MPa. Nilai tersebut turun menjadi 592 MPa pada kondisi B, kemudian sedikit meningkat menjadi 596 MPa pada kondisi C. Dengan demikian, hubungan UTS terhadap kondisi parameter tidak sepenuhnya monoton, tetapi kondisi A tetap sekitar 6,6% lebih tinggi daripada kondisi B dan 6,0% lebih tinggi daripada kondisi C. Regangan menunjukkan tren menurun yang lebih konsisten, yaitu 40,0%, 36,3%, dan 34,6%, sehingga peningkatan kondisi arus berkaitan dengan penurunan keuletan sambungan. Patahan pada kondisi A dan C terjadi pada base metal, yang menunjukkan bahwa pada sebagian besar spesimen kekuatan daerah las tidak lebih rendah daripada material induk.

Variasi antarspesimen cukup terlihat pada kondisi C (576-629 MPa). Oleh karena itu, penambahan simpangan baku dan analisis statistik pada penelitian lanjutan diperlukan sebelum menyatakan hubungan linear antara heat input dan UTS.

Hasil Pengamatan Struktur Mikro



Gambar 4. Struktur Mikro WM, HAZ, dan BM pada Tiga Kondisi Heat Input Nominal

Sumber: Dokumentasi metalografi penelitian; pembesaran 200 $\times$ dan scale bar 50 μ m.

Citra WM memperlihatkan perubahan morfologi hasil solidifikasi antar kondisi. Pada kondisi 54,0 dan 58,5 kJ/cm nominal, jaringan gelap bercorak seluler-dendritik tampak lebih tegas dibandingkan kondisi 49,5 kJ/cm nominal. Pada baja tahan karat austenitik, morfologi tersebut dapat berkaitan dengan pola solidifikasi dan kemungkinan keberadaan delta ferrite, tetapi identifikasi fasa tidak dapat dipastikan hanya melalui citra optik tanpa informasi etsa atau pengukuran tambahan. Pada HAZ, kondisi tertinggi memperlihatkan fitur yang lebih memanjang dan kasar, selaras dengan penurunan kekerasan HAZ dari 165,3 HV menjadi 158,3 HV.

BM pada ketiga kondisi tetap menunjukkan butir poligonal austenitik dengan garis kembar anil yang relatif serupa. Tidak tampak retak terbuka yang jelas pada skala 200 $\times$. Beberapa garis gelap memanjang pada citra kondisi 49,5 kJ/cm dapat berasal dari goresan preparasi atau artefak polishing, sehingga tidak ditafsirkan sebagai retak tanpa pemeriksaan tambahan. Kesamaan tinggi antara citra WM dan HAZ pada kondisi pertama juga perlu diverifikasi kembali terhadap arsip foto asli untuk memastikan pemetaan zona.

Implikasi Teknis

Secara keseluruhan, kondisi A (55 A; kode heat input nominal 49,5 kJ/cm) memberikan kombinasi terbaik berupa UTS rerata 634 MPa, regangan 40,0%, kekerasan WM 168,0 HV, dan kekerasan HAZ 165,3 HV. Kondisi B menghasilkan UTS terendah, sedangkan kondisi C memiliki UTS sedikit lebih tinggi daripada B tetapi regangan dan kekerasan HAZ terendah. Rekomendasi proses tetap harus dinyatakan berdasarkan arus dan kecepatan gerak yang terukur, karena nilai heat input nominal belum dikoreksi menggunakan tegangan busur aktual dan efisiensi proses.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Variasi parameter GTAW pada arus 55 A, 60 A, dan 65 A dengan kecepatan 6 cm/menit memengaruhi kekerasan WM dan HAZ. Kekerasan HAZ menurun dari 165,3 HV menjadi 162,6 HV dan 158,3 HV, sedangkan kekerasan WM berubah dari 168,0 HV menjadi 163,3 HV dan 163,3 HV.

Rerata UTS pada kondisi A, B, dan C berturut-turut sebesar 634 MPa, 592 MPa, dan 596 MPa. Regangan menurun dari 40,0% menjadi 36,3% dan 34,6%. Kondisi A memberikan kombinasi kekuatan dan keuletan terbaik, meskipun UTS tidak menurun secara monoton antara kondisi B dan C.

Pengamatan metalografi 200× menunjukkan perbedaan morfologi solidifikasi pada WM dan kecenderungan fitur yang lebih kasar pada HAZ pada kondisi termal lebih tinggi, sementara BM relatif stabil. Interpretasi fasa bersifat kualitatif karena jenis etsa dan pengukuran ukuran butir tidak tersedia.

Nilai 49,5 kJ/cm, 54,0 kJ/cm, dan 58,5 kJ/cm merupakan kode heat input nominal yang dihitung dari setting tegangan 90 V. Karena tegangan busur aktual dan efisiensi termal tidak direkam, nilai tersebut belum dapat dinyatakan sebagai heat input bersih. Berdasarkan parameter yang benar-benar terukur, kondisi 55 A dan 6 cm/menit merupakan kondisi terbaik dari tiga variasi yang diuji.

Saran

Penelitian selanjutnya perlu merekam tegangan busur aktual selama pengelasan, memasukkan efisiensi termal dalam perhitungan heat input, dan menggunakan pengendali travel speed agar parameter lebih konsisten. Pengujian mekanik sebaiknya dilengkapi simpangan baku dan analisis statistik. Pada metalografi, jenis etsa, waktu etsa, lokasi pengambilan citra, ukuran butir, dan fraksi delta ferrite perlu dilaporkan untuk memperkuat hubungan antara siklus termal dan sifat mekanik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Aljufri, S. Sofyan, M. N. Rizki, R. Putra, and I. Mawardi, "Influence of Shielding Gas Flow on the TIG Welding Process Using Stainless Steel 304 Material," *J. Weld. Technol.*, vol. 6, no. 1, 2024, doi: 10.30811/jowt.v6i1.5322.
- [2] L. Amalia, M. L. Sinambela, R. A. Tanjung, and J. Awali, "Analysis of Welding Current Variation of SMAW and GTAW Combination Welding with Double V Groove on the Mechanical Properties and Microstructure of SS304 Stainless Steel," *SPECTA J. Technol.*, vol. 7, no. 1, pp. 427–433, 2023, doi: 10.35718/specta.v7i1.663.
- [3] A. Widyianto, A. S. Baskoro, and G. Kiswanto, "Investigation on Weld Characteristic, Welding Position, Microstructure, and Mechanical Properties in Orbital Pulse Current Gas Tungsten Arc Welding of AISI 304L Stainless Steel Pipe," *Int. J. Technol.*, vol. 13, no. 3, pp. 473–483, 2022, doi: 10.14716/ijtech.v13i3.3134.
- [4] H. Hamdani, A. S. Ismy, and M. Rizki, "Pengaruh Variasi Arus Pengelasan Kombinasi GTAW dan SMAW terhadap Sifat Mekanik pada Carbon Steel A53 GR B," *J. Teknol.*, vol. 22, no. 2, p. 99, 2022, doi: 10.30811/teknologi.v22i2.3265.
- [5] Y. R. Fauzi and A. E. Heka, "Pengaruh Heat Input pada Pengelasan Combine GTAW-SMAW Dissimilar Material Baja AISI 1045 dengan SS 304 terhadap Sifat Mekanik," *Mach. J. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 2, 2024, doi: 10.33019/jm.v10i2.5406.
- [6] S. Kumar, N. S. Madugula, R. Kumar, N. Kumar, J. Giri, and M. Kanan, "An Extensive Analysis of GTAW Process and Its Influence on the Microstructure and Mechanical Properties of SDSS 2507," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 33, pp. 8675–8686, 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2024.11.157.
- [7] M. S. Amri and A. T. Kusuma, "Analisis variasi arus dan jenis pelarut fluks terhadap struktur mikro dan kekerasan baja tahan karat austenitik tipe 304 yang dilas dengan pengelasan Tungsten Inert Gas," *J. Weld. Technol.*, vol. 4, no. 1, 2022.
- [8] M. Shobirin and M. Mulyadi, "Analisa Pengaruh Variasi Arus pada Pengelasan GTAW Ditinjau dari Pengujian Tarik pada Material Plat ASTM A36," *Innov. Technol. Methodical Res. J.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2024, doi: 10.47134/innovative.v3i1.99.

- [9] M. H. Frihat, F. Al Quran, M. Al-Odat, and J. Al-Jarrah, "Influence of Current Welding on Mechanical Properties and Microstructure of Argon Arc Welding of Type-304L Austenite Stainless Steel," *Int. Rev. Mech. Eng.*, vol. 18, no. 4, pp. 177–182, 2024, doi: 10.15866/ireme.v18i4.24369.
- [10] M. Ghalambaz, M. Shamanian, A. M. Eslami, M. Abdollahi, and E. Abdolvand, "Investigation of the Effect of Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welding on Austenitic AISI 321 Stainless Steel Bonding Properties," *J. Adv. Mater. Eng.*, vol. 41, no. 1, pp. 59–79, 2022, doi: 10.47176/jame.41.1.11414.
- [11] B. Kurniawan, Basuki, and M. A. Irfai, "Pengaruh Variasi Parameter Pengelasan terhadap Sifat Mekanik Sambungan Las," *J. Reaktom*, vol. 5, pp. 28–32, 2020.
- [12] A. International, "ASTM E384-22: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials," ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2022.
- [13] A. International, "ASTM E8/E8M-25: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2025.
- [14] A. B. Pereira and F. J. M. Q. de Melo, "Quality Assessment and Process Management of Welded Joints in Metal Construction—A Review," *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 1, p. 115, 2020, doi: 10.3390/met10010115.
- [15] Y. M. Zhang, Y.-P. Yang, W. Zhang, and S.-J. Na, "Advanced Welding Manufacturing: A Brief Analysis and Review of Challenges and Solutions," *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 142, no. 11, p. 110816, 2020, doi: 10.1115/1.4047947.