DOI: https://doi.org/10.9744/jtm.23.2.70-81

JURNAL TEKNIK MESIN

Vol 23, No. 2, Oktober 2026, 70-81
ISSN 1410-9867 print / ISSN 2656-3290 online

Karakteristik Ketangguhan *Impact* dan Struktur Mikro *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) Baja ASTM A36

Rizki Setiawan[1], Dwita Suastiyanti[1], Ismojo[1], Pathya Rupajati[1*], Samuel Trinata Winnyarto[2]
[1] Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Indonesia
Jalan Raya Puspiptek, Tangerang Selatan 15310, Indonesia
[2] Departement of Industrial Management, National Taiwan University of Science and Technology
N.43, Sec. 4, Keelung Rd., Da'an Dist. Taipei City 106335, Taiwan (ROC)
*Penulis korespondensi; E-mail: pathya.rupajati@iti.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:
Received 16 April 2026
Revised 16 July 2026
Accepted 4 Sept 2026
Available online 30 Oct 2026
Communicated by Pathya Rupajati

Keywords: *impact-toughness SMAW, carbon Steel A36, heat input, microstructure.*

ABSTRACT

The quality of welded joints is strongly influenced by welding parameters, particularly heat input and electrode type. Variations in these parameters can affect microstructural evolution and the mechanical properties of welded joints. This study investigates the effects of heat input and electrode type on the microstructure and impact toughness of ASTM A36 carbon steel butt joints fabricated using the Shielded Metal Arc Welding (SMAW) process. Three heat input levels, namely 0.91, 1.33, and 1.89 kJ/mm, and two electrode types, E7018 and E6013, were investigated. The welding current, voltage, and travel speed were maintained at the same levels for both electrode types. Microstructural characterization was conducted in the heat-affected zone (HAZ) and weld metal using optical microscopy, while impact toughness was evaluated using the Charpy impact test. The results indicate that variations in heat input and electrode type significantly affect the microstructural characteristics of both the HAZ and weld metal. At a heat input of 0.91 kJ/mm, the weld metal produced using both electrode types was predominantly characterized by an acicular ferrite microstructure. The Charpy impact test results revealed that increasing the welding heat input tended to reduce the impact toughness of the welded joints. The highest impact toughness of 26.43 J was obtained using the E7018 electrode at a heat input of 0.91 kJ/mm, whereas the lowest value of 18.60 J was obtained using the E6013 electrode at a heat input of 1.89 kJ/mm.

This is an open access article under the CC BY license

PENDAHULUAN

Baja karbon rendah ASTM A36 merupakan baja yang banyak digunakan karena kombinasi sifat mekanik dan *weldability* yang baik. Baja ini umumnya mengandung karbon 0,25–0,26%, mangan, silikon, fosfor, dan belerang. Kandungan karbon yang rendah ini memiliki *ductility* yang baik dan dapat meminimalkan risiko *cold cracking* selama pengelasan, sehingga baja karbon ASTM A36 dapat diaplikasikan pada proses pengelasan fusi seperti *shielded metal arc welding* (SMAW). Pengelasan SMAW merupakan salah satu proses pengelasan busur listrik di mana panas yang dihasilkan terbentuk antara *consumable electrode* dan logam dasar. Elektroda tersebut dilapisi

flux, yang selanjutnya mencair akibat panas intens dari busur bersama dengan logam dasar, sehingga membentuk *weld pool*. Selanjutnya, *weld pool* tersebut membeku dan menghasilkan ikatan metalurgi yang menggabungkan kedua logam secara permanen [1]. Selama proses pengelasan berlangsung, pembakaran fluks menghasilkan gas pelindung dan *slag* yang berfungsi untuk melindungi logam cair dari kontaminasi atmosfer, seperti oksida dan inklusi, serta membantu menjaga kestabilan busur listrik. SMAW dapat diaplikasikan pada baja karbon [2]–[4], baja tahan karat dan besi cor untuk industri seperti penerbangan, otomotif, pipa minyak dan gas, serta pembuatan tangki bertekanan [5], [6]. Namun demikian, pada umumnya pengelasan ini memiliki laju deposisi yang lebih lambat [1], [7]. Selain itu, kualitas sambungan las yang dihasilkan oleh SMAW sangat bergantung pada pemilihan dan pengendalian parameter proses pengelasan. Parameter-parameter yang mempengaruhi transformasi struktur mikro selama proses las, termasuk *heat input,* jenis elektroda, polaritas, kecepatan las, jarak antara elektroda dan benda kerja, dan geometri alur atau sudut las.

Parameter-parameter pengelasan ini menentukan siklus termal dan laju pendinginan yang dialami oleh *weld metal* dan *heat affected zone* (HAZ), yang mempengaruhi pembentukan struktur mikro dan sifat mekanik sambungan pengelasan. Beberapa penelitian mengenai SMAW, yaitu Pathak dkk. [8] meneliti pengaruh *heat input* dan sudut elektroda terhadap kekuatan tarik sambungan pelat baja karbon rendah menggunakan metode SMAW. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa peningkatan *heat input* dan sudut elektroda yang optimal dapat meningkatkan kekuatan tarik sambungan. Fitri dkk. [9] meneliti pengaruh variasi *heat input* pengelasan SMAW terhadap sifat mekanik dan struktur mikro baja karbon rendah SA 516 Gr. 70. Hasil uji kekerasan dan Charpy *impact* menunjukkan bahwa *heat input* las 70 A menghasilkan kekuatan dan ketangguhan *impact* tertinggi, sementara analisis struktur mikro menghasilkan ukuran butir yang lebih kasar pada *heat input* tinggi.

Penelitian ini menjelaskan bahwa peningkatan *heat input* SMAW meningkatkan kekuatan dan ketangguhan sambungan las, sekaligus mengubah struktur mikro baja karbon rendah. Hal ini digunakan sebagai dasar pemilihan parameter *heat input* las untuk mendapatkan kombinasi optimal antara kekuatan dan ketangguhan material, di mana Zhang dkk. [10] meneliti pengaruh *heat input* pada proses pengelasan terhadap mikrostruktur dan sifat mekanik pada *coarse grained heat affected zone* (CGHAZ) baja *microalloy* Nb-V-Ti-N. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan *heat input* menyebabkan perubahan struktur mikro dari *lath bainite* menjadi *ferrite* yang memengaruhi kekuatan dan ketangguhan sambungan las. Presipitasi unsur Nb, V, dan Ti juga berperan dalam mengontrol pertumbuhan butir serta meningkatkan kekuatan baja. Selain itu, Suharno dkk. [11] meneliti pengaruh variasi arus pada proses SMAW terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja ASTM A36. Pengujian dilakukan dengan *heat input* 110 A, 120 A, dan 130 A menggunakan elektroda E7016, kemudian dianalisis melalui mikroskop metalografi, uji kekerasan, dan uji tarik. Hasil menunjukkan peningkatan *heat input* meningkatkan kekerasan dan kekuatan tarik, serta menyebabkan perubahan struktur mikro menjadi *grain boundary ferrite*, Widmanstätten *ferrite,* dan *acicular ferrite*. Awad dkk. [12] meneliti pengaruh teknik pengelasan GTAW dan SMAW terhadap sifat mekanik sambungan baja S275JR berkarbon rendah. Hasil uji tarik menunjukkan sambungan SMAW memiliki *ultimate tensile strength* (UTS) lebih tinggi dan efisiensi sambungan lebih baik dibanding GTAW, meskipun kedua sambungan patah di HAZ. Analisis struktur mikro SMAW menunjukkan bahwa hasil kekuatan tarik dan ketangguhan yang lebih baik. Kharanan dkk. [13] meneliti pengaruh variasi teknik pengelasan dan *heat input* SMAW terhadap sifat mekanik dan struktur mikro baja ASTM A572 Grade 50. Hasil uji tarik menunjukkan bahwa peningkatan *heat input* dari 90 A ke 110 A meningkatkan kekuatan sambungan dari 587,08 MPa menjadi 625,95 MPa, meskipun ketangguhan *impact* sedikit menurun dari 291 J menjadi 284 J. Analisis mikrostruktur menunjukkan matriks *ferrite* dengan distribusi *pearlite* dan *retained austenite,* serta pertumbuhan ukuran butir pada *heat input* tinggi. Variasi arus dapat memengaruhi keseimbangan antara kekuatan dan ketangguhan material, di mana *impact* dihasilkan terdapat pada arus yang paling rendah [14].

Mishra dkk. [15] meneliti sambungan dissimilar antara API X70 dan duplex stainless steel (DSS) 2205 menggunakan proses SMAW dengan elektroda hasil pengembangan laboratorium. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sambungan dengan elektroda yang dikembangkan memiliki kekuatan tarik maksimum sebesar 684,37 MPa dan ketangguhan impak yang lebih baik dibandingkan elektroda komersial, yang juga disebabkan oleh terbentuknya struktur mikro yang lebih halus dan homogen pada daerah sambungan. Penelitian ini menunjukkan bahwa komposisi elektroda SMAW dapat memengaruhi pembentukan struktur mikro yang memengaruhi sifat mekanis sambungan las. Rosadi dkk. [16] meneliti pengaruh variasi elektroda E6013 dan E7016 pada proses SMAW terhadap sifat mekanis baja karbon SS400. Pengelasan dilakukan menggunakan elektroda berdiameter 3,2 mm, menunjukkan bahwa jenis elektroda memberikan pengaruh terhadap karakteristik dan kualitas mekanis sambungan las. Namun demikian, mekanisme kombinasi variasi *heat input* dan variasi elektroda mempengaruhi perubahan struktur mikro dan ketangguhan *impact* masih belum diteliti. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan investigasi proses pengelasan SMAW pada baja ASTM A36 dengan ketebalan 10 mm untuk menentukan bagaimana variasi *heat input* dan variasi jenis elektroda dapat mempengaruhi struktur mikro *weld metal, heat affected zone* (HAZ) dan ketangguhan *impact*.

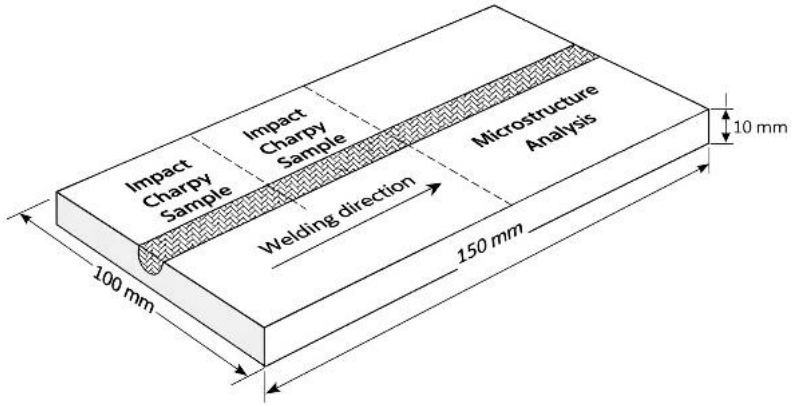
METODE

Logam dasar yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja ASTM A36 dengan komposisi kimia dan sifat mekanik yang ditunjukkan pada Gambar 1(a), Tabel 1, dan Tabel 2. Spesimen dipotong dengan dimensi 150 mm × 100 mm × 10 mm. Hasil pengamatan struktur mikro logam dasar baja ASTM A36 menggunakan mikroskop optik pada perbesaran 200× ditunjukkan pada Gambar 1(b), yang menunjukkan struktur mikro berupa *ferrite* dan *pearlite*. Pengelasan sambungan *butt joint* dilakukan menggunakan metode *shielded metal arc welding* (SMAW) dengan mesin las Rhino MMA 330. Mesin las yang digunakan memiliki spesifikasi arus DC, rentang arus 40–300 A, *duty cycle* 60%, efisiensi 80%, dan tegangan 20–29 V. Parameter pengelasan yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 3 dengan variasi *heat input* dan jenis elektroda. Elektroda yang digunakan adalah AWS E7018 dan E6013 dengan diameter 3,2 mm dan panjang 400 mm. Elektroda E7018 dikeringkan pada temperatur 120 °C selama 1 jam sebelum digunakan. Nilai *carbon equivalent* (CE) elektroda E7018 dan E6013 masing-masing sebesar 0,14 dan 0,17, sedangkan logam dasar baja ASTM A36 memiliki nilai CE sebesar 0,26. Nilai CE dihitung berdasarkan persamaan *carbon equivalent* berdasarkan persen berat (wt%) unsur penyusunnya menurut *Japanese Industrial Standards* (JIS) pada persamaan 1.

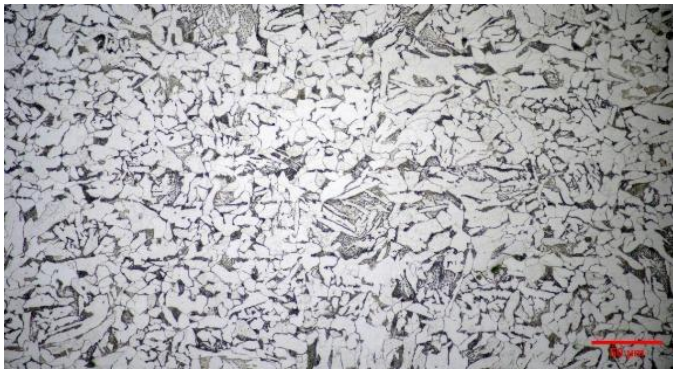
$$\mathrm{CE} = \mathrm{wt\%_C} + \frac{\mathrm{wt\%_{Mn}}}{6} + \frac{\mathrm{wt\%_{Si}}}{24} + \frac{\mathrm{wt\%_{Cr}}}{5} + \frac{\mathrm{wt\%_{Ni}}}{40} + \frac{\mathrm{wt\%_{Mo}}}{4} + \frac{\mathrm{wt\%_V}}{14} \quad (1)$$

Variabel konstan yang digunakan meliputi polaritas *direct current* elektroda negatif, *single groove butt joint* yaitu 60°, dan posisi pengelasan yang dilakukan adalah 1G.

Setelah proses pengelasan selesai dan spesimen didinginkan pada temperatur ruang, kemudian spesimen tersebut dibersihkan menggunakan kawat besi dan aseton. Semua spesimen dilakukan pengujian *non-destruktif* menggunakan *dye penetrant* sesuai standar ASTM E165 yang terdiri dari *cleaner/remover* Magnaflux SKC-S, *penetrant* Magnaflux SKL-SP2, dan *developer* Magnaflux SKD-S2 untuk mendeteksi adanya cacat permukaan seperti *surface crack, undercut* atau porositas pada hasil pengelasan [17]. Setelah itu, spesimen dilakukan analisis struktur mikro menggunakan standar ASTM E23. Spesimen struktur mikro dipasang dengan cetakan *epoxy*, kemudian dipoles dengan kertas amplas (200,350, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500, dan 2000 (grit), dilanjutkan dengan bubuk Al_2O_3 dengan ukuran partikel 0,3 μm. Selanjutnya, semua spesimen dietsa menggunakan larutan Nital 2% selama 5-10 detik. Selanjutnya, diamati struktur mikro pada *base metal*, HAZ dan *weld metal* menggunakan mikroskop optik BX41M-LED.



(a)



(b)

Gambar 1. (a) Skema spesimen pengelasan SMAW, dan (b) struktur mikro *base metal* baja karbon ASTM A36 dengan perbesaran 200x

Tabel 1. Komposisi kimia logam dasar dan elektroda (%wt)

Logam Dasar	C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Mo	Cu
Baja karbon A36	0,26	0,72	0,017	0,023	0,32	0,06	0,05	0,02	0,20
AWS E7018	0,04-0,95	0,8-1,4	≤ 0,03	≤ 0,03	0,25-0,70				
AWS E6013	0,08	0,38	0,012	0,012	0,26				

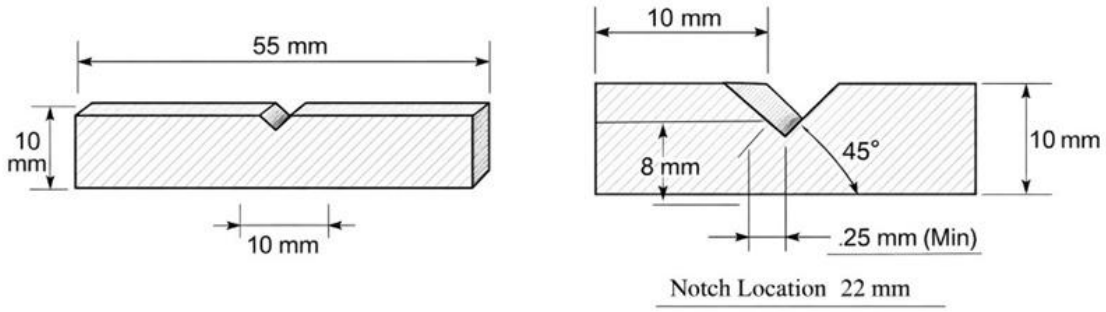
Tabel 2. Sifat mekanik Baja ASTM A36

Sifat Mekanis	UTS (MPa)	Titik luluh (MPa)	Modulus elastisitas (GPa)	Modulus geser (Gpa)	Kekerasan (HB)	Kekuatan impak (Joule)
Baja ASTM A36	500	250	200	79,3	119	20

Tabel 3. Parameter proses pengelasan

Spesimen	Elektroda	Arus (A)	Voltase (V)	Kecepatan Pengelasan (mm/menit)	*Heat input* (kJ/mm)
1		80	19	100	0,91
2	E7018	100	20	90	1,33
3		120	21	80	1,89
4		80	19	100	0,91
5	E6013	100	20	90	1,33
6		120	21	80	1,89

Pengujian *impact* Charpy menggunakan standar ASTM E23 yang ditunjukkan pada Gambar 2 dilakukan sebanyak tiga replikasi, bertujuan untuk mengukur energi yang diserap material akibat beban kejut pada temperatur ruang. Energi yang terserap ini mencerminkan ketangguhan (*toughness*) material terhadap pembebanan cepat untuk mengevaluasi kualitas sambungan las. Mesin yang digunakan untuk pengujian impact adalah *Universal Testing Machine* Charpy *Impact* Hung Ta dengan kapasitas 30 kg dan berat palu 23 kg.



Gambar 2. Spesimen pengujian Charpy *impact*

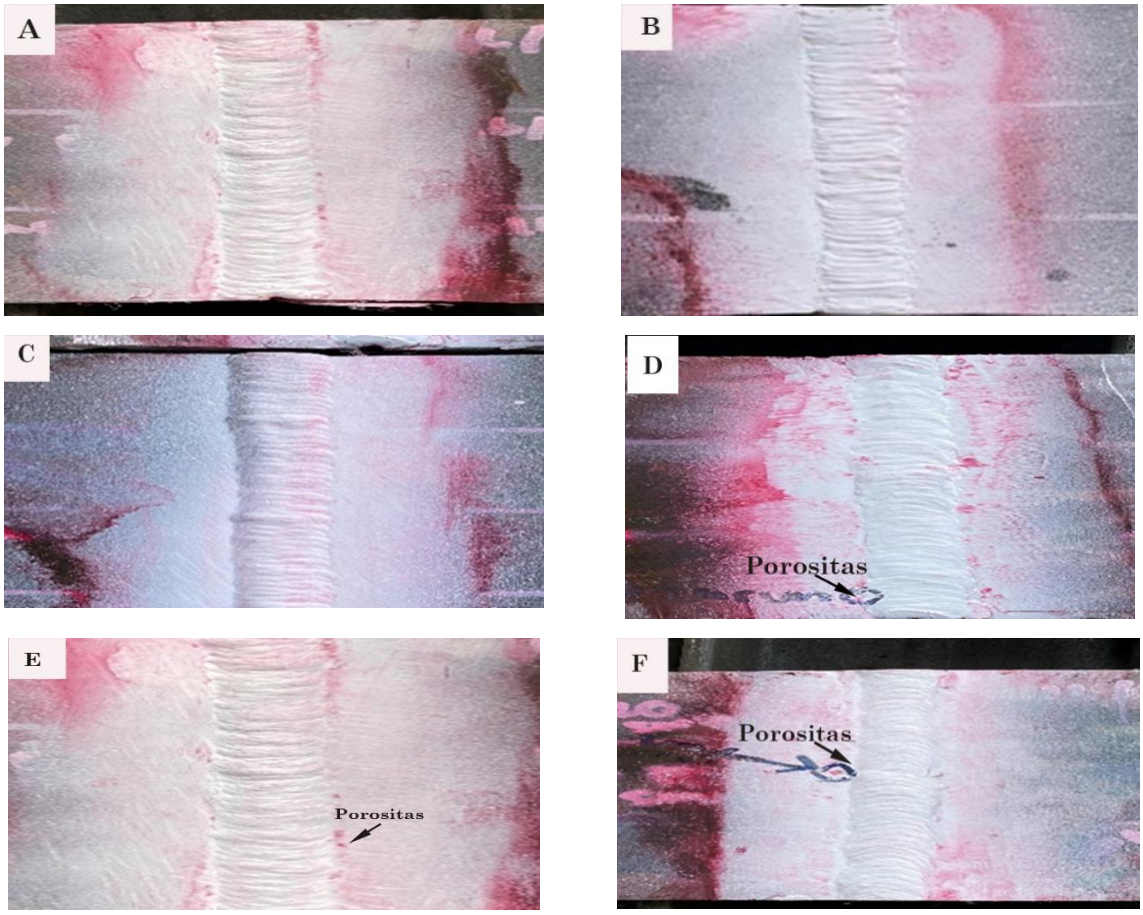
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengamatan Visual

Eksperimen pengelasan SMAW pada baja karbon ASTM A36 ini dilakukan dengan memvariasikan *heat input* dan elektroda. Hasil pengamatan visual menggunakan pengujian tidak merusak menggunakan *dye penetrant* pada sambungan las SMAW pada masing-masing variasi parameter pengelasan ditunjukkan pada Gambar 3. Berdasarkan Gambar 3a, hasil pengujian *dye penetrant* pada variasi *heat input* 0,91 kJ/mm, menggunakan elektroda E7018 tidak menunjukkan indikasi porositas, *undercut,* maupun retak. Sedangkan Gambar 3b pada penggunaan elektroda E6013 juga tidak menunjukkan porositas. Pada *heat input* 0,91 kJ/mm, panas yang di *weld metal* tidak cukup untuk membuat *weld pool* dalam kondisi lebih lama, sehingga gas yang terbentuk selama proses peleburan tidak sempat seluruhnya keluar sebelum logam mengalami solidifikasi [18]. Selain itu, elektroda E7018 memiliki sifat elektroda rendah hidrogen, di mana difusi hidrogen ke dalam *weld metal* relatif rendah sehingga dapat mengurangi kemungkinan terbentuknya retak akibat terjebaknya hidrogen dalam *weld metal*. Sedangkan elektroda E6013 memiliki lapisan *flux rutile* di mana pembekuan slag relatif lebih cepat sehingga gas yang terbentuk selama proses pengelasan lebih mudah terperangkap.

Hasil pengujian *dye penetrant* pada pengelasan dengan *heat input* 1,33 kJ/mm dan elektroda E7018 yang ditunjukkan pada Gambar 3c tidak menunjukkan adanya cacat permukaan seperti porositas. Hal ini bisa dikarenakan penggunaan *heat input* yang menghasilkan fusi yang optimal sehingga dapat meminimalkan terbentuknya cacat porositas atau *undercut*. Stabilitas busur yang terbentuk antara benda kerja dan elektroda E7018 menghasilkan manik las yang lebih homogen [19]. Begitu juga, Gambar 3d hasil pengujian *dye penetrant* menggunakan elektroda E6013 menunjukkan adanya porositas (*minor porosity*). Porositas ini disebabkan oleh adanya gas yang terperangkap selama proses solidifikasi *weld metal*. *Slag* yang terbentuk menggunakan elektroda E6013 ini membeku relatif lebih cepat masih memungkinkan terbentuknya porositas kecil [20].

Pada *heat input* 1,89 kJ/mm dengan penggunaan elektroda E7018 dan E6013, seperti ditunjukkan pada Gambar 3e dan 3f, ditemukan cacat porositas pada daerah tepi las. Peningkatan *heat input* menyebabkan *weld pool* menjadi lebih besar dan memperpanjang waktu logam las berada dalam kondisi cair. Kondisi ini memberikan kesempatan bagi gas yang terbentuk selama proses pengelasan untuk keluar sebelum terjadi solidifikasi. Namun, keberadaan porositas pada daerah



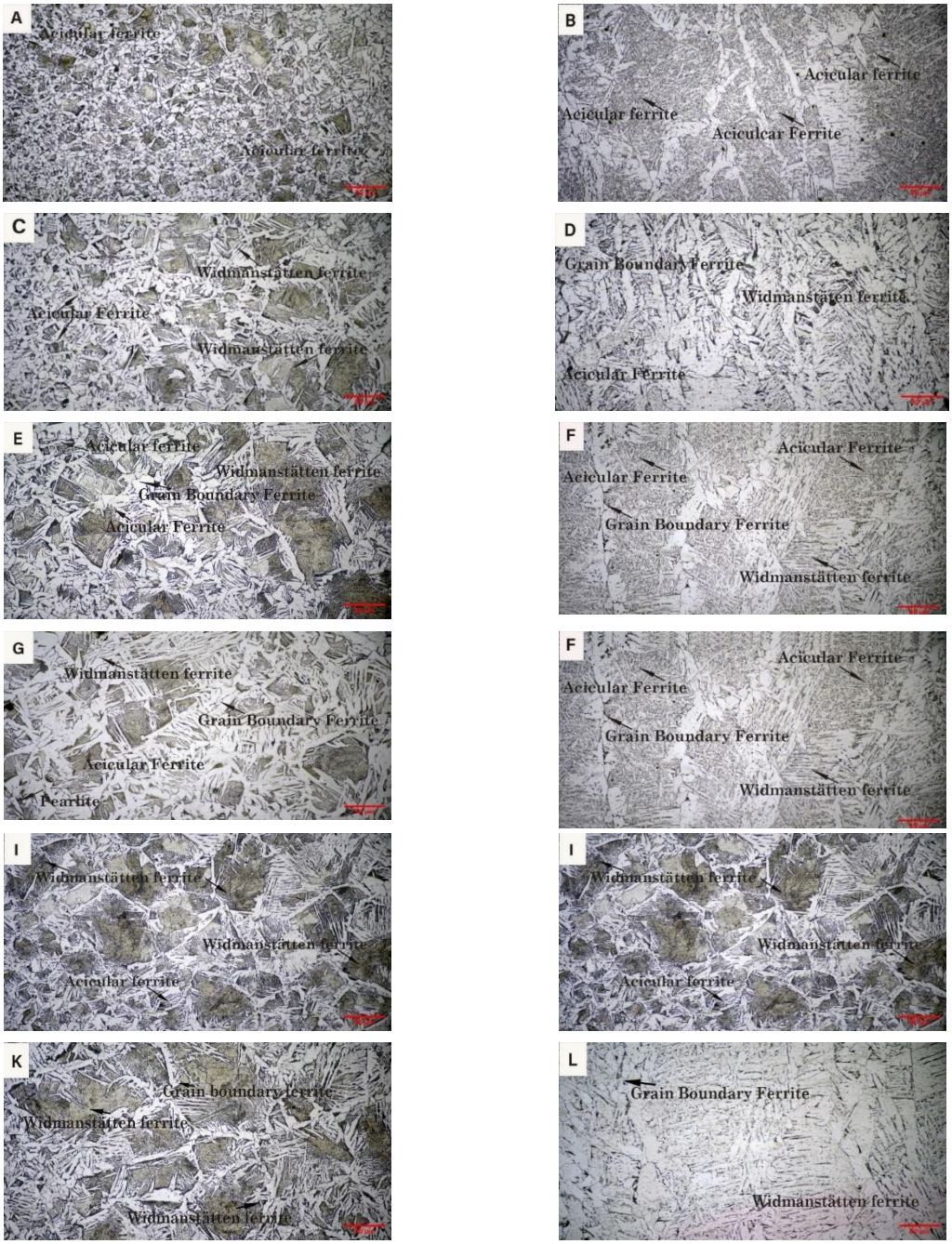
Gambar 3. Pengamatan visual hasil pengujian liquid *dye penetrant*

tepi menunjukkan bahwa pelepasan gas juga dipengaruhi oleh aliran logam cair dan karakteristik solidifikasi *weld pool*. Perpindahan panas di dalam *weld pool* memengaruhi distribusi temperatur dan pola aliran logam cair selama proses pengelasan [21]. Daerah tepi *weld pool* mengalami pelepasan panas yang lebih cepat sehingga solidifikasi berlangsung lebih awal dibandingkan bagian tengah. Akibatnya, gas yang belum sempat keluar dapat terperangkap di dalam logam las dan membentuk porositas. Pembentukan dan lokasi porositas dipengaruhi oleh interaksi antara viskositas logam cair, gaya apung, tekanan gas, serta waktu yang tersedia sebelum solidifikasi [22]. Berdasarkan AWS D1.1/D1.1M:2020, cacad pengelasan yang muncul dari pengujian *dye penetrant* masih berada dalam batas toleransi yang diizinkan karena tidak terlihat adanya retak [23]. Endramawan dkk. [24] mengevaluasi jenis cacat pengelasan *butt joint* SMAW berdasarkan standar ASME Section XI menggunakan metode *dye penetrant* untuk cacat permukaan.

Analisis Pengujian Metalografi

Hasil pengamatan metalografi dari pengelasan SMAW baja karbon ASTM A36 dengan variasi *heat input* dan elektroda ditunjukkan pada Gambar 4. Terdapat dua daerah hasil pengelasan yang diamati, yaitu *heat affected zone* (HAZ) dan *weld metal*. Struktur mikro dari kedua daerah pengelasan ini membentuk struktur mikro yang berbeda yang disebabkan oleh perbedaan temperatur puncak (*peak temperature*) dan laju pendinginan. Gambar 4 menunjukkan bahwa pengamatan struktur mikro variasi *heat input* dan variasi elektroda memberikan pengaruh terhadap pembentukan struktur mikro baja ASTM A36. Gambar 4a–d menunjukkan struktur mikro HAZ dan *weld metal* yang terbentuk dari variasi *heat input* 0,91 kJ/mm. Gambar 4a menunjukkan struktur mikro yang terbentuk pada HAZ menggunakan elektroda E7018 didominasi oleh *acicular ferrite* dengan morfologi butir yang halus. Sedangkan struktur mikro yang terbentuk pada *weld metal* menggunakan elektroda E7018 yang didominasi oleh *acicular*

ferrite ditunjukkan pada Gambar 4b. *Heat input* yang rendah ini menghasilkan laju pendinginan yang lebih cepat sehingga menyebabkan terbentuknya *acicular ferrite* yang dapat menghambat perambatan retak sehingga meningkatkan ketangguhan *impact*. Sedangkan pada penggunaan elektroda E6013, struktur mikro yang terbentuk di HAZ didominasi oleh *acicular ferrite* dan sedikit Widmanstätten *ferrite* yang ditunjukkan pada Gambar 4c. Sedangkan struktur mikro yang terbentuk pada *weld metal* menggunakan elektroda E6013 yang didominasi oleh *acicular ferrite* dan sedikit Widmanstätten *ferrite* ditunjukkan pada Gambar 4d.



Gambar 4. Struktur mikro HAZ dan *weld metal* pada variasi *heat input* dan elektroda menggunakan perbesaran 200x, a) struktur mikro HAZ spesimen 1; b) struktur mikro *weld metal* spesimen 1; c) struktur mikro HAZ spesimen 4; d) struktur mikro *weld metal* spesimen 4; e) struktur mikro HAZ spesimen 2; f) struktur mikro *weld metal* spesimen 2; g) struktur mikro HAZ spesimen 5; h) struktur mikro spesimen 5; i) struktur mikro HAZ spesimen 3; j) struktur mikro *weld metal* spesimen 3, k) struktur mikro HAZ spesimen 6, l) struktur mikro *weld metal* spesimen 6

Pembentukan struktur mikro pada parameter proses *heat input* 1,33 kJ/mm dengan ditunjukkan pada Gambar 4e-h. Struktur mikro yang terbentuk di HAZ menggunakan elektroda E7018 menghasilkan Widmanstätten *ferrite* yang lebih dominan yang disebabkan kenaikan *heat input,* ditunjukkan pada Gambar 4e. Sedangkan struktur mikro di *weld metal* yang ditunjukkan pada Gambar 4f didominasi oleh ferrite dan Widmanstätten *ferrite*. Selain itu, masih terlihat adanya *acicular ferrite* yang sedikit sehingga menyebabkan penurunan ketangguhan *impact*. Peningkatan *heat input* dapat menurunkan pembentukan *acicular ferrite*. Gambar 4g-h menunjukkan struktur mikro menggunakan *heat input* 1,33 kJ/mm dan elektroda E6013. Pembentukan struktur mikro HAZ yang ditunjukkan pada Gambar 4g didominasi oleh *Widmanstätten ferrite, grain boundary ferrite* yang lebih besar, dan *pearlite* yang tersebar tidak merata. Terbentuknya struktur ini menunjukkan bahwa peningkatan *heat input* dan penggunaan elektroda E6013 yang bersifat *rutile* cenderung mempercepat *grain coarsening* yang dapat menurunkan nilai ketangguhan *impact* dibandingkan dengan elektroda E7018. Sedangkan pembentukan struktur mikro di *weld metal* yang ditunjukkan pada Gambar 4h didominasi oleh *Widmanstätten ferrite* dan *grain boundary ferrite* yang mengikuti arah solidifikasi. Selain itu, masih terdapat *acicular ferrite* walaupun relatif sedikit, yang menyebabkan penurunan ketangguhan *impact* pada *heat input* yang sama. Kantor dkk. [25] menjelaskan bahwa *acicular ferrite* pada *weld metal* dapat meningkatkan ketangguhan karena struktur *interlocking grain boundary* yang menghambat propagasi retak. Pembentukan *acicular ferrite* dipengaruhi oleh laju pendinginan dan ukuran butir austenit [26], di mana *acicular ferrite* merupakan fasa sangat mempengaruhi ketangguhan logam [27], [28].

Gambar 4i-j menunjukkan pembentukan struktur mikro menggunakan parameter proses *heat input* 1,89 kJ/mm dan elektroda E7018. Struktur mikro HAZ menggunakan elektroda E7018 yang ditunjukkan pada Gambar 4i menunjukkan pertumbuhan butir yang disebabkan oleh kenaikan *heat input*. Selain itu, struktur mikro tersebut didominasi oleh *grain boundaries ferrite* dan *Widmanstätten ferrite*. Hal ini dapat disebabkan oleh pendinginan yang lebih lambat yang memungkinkan terjadinya difusi yang lebih besar. Sedangkan Gambar 4j menunjukkan struktur mikro *weld metal* yang didominasi oleh *Widmanstätten* ferrite, *grain boundaries ferrite,* dan sedikit *acicular ferrite*. Gambar 4k-l menunjukkan pembentukan struktur mikro HAZ dan *weld metal* pada parameter proses *heat input* 1,89 kJ/mm dan elektroda E6013. Struktur mikro HAZ membesar seiring dengan kenaikan *heat input* yang didominasi oleh *Widmanstätten ferrite* dan *grain boundary ferrite*, ditunjukkan pada Gambar 4k. Hal ini merupakan pengaruh dari *grain coarsening* yang diakibatkan oleh kenaikan *heat input*. Sedangkan struktur mikro yang terbentuk pada *weld metal* didominasi oleh *Widmanstätten ferrite* dan *grain boundary ferrite*, ditunjukkan pada Gambar 4l. *Heat input* yang lebih tinggi menyebabkan temperatur puncak lebih tinggi dan waktu pendinginan lebih lama sehingga menyebabkan pertumbuhan butir austenit yang lebih besar yang kemudian terbentuk *grain boundary ferrite* dan *Widmanstätten ferrite* yang terbentuk dari *austenite*.

Pada *heat input* 1,89 kJ/mm *grain boundary ferrite* mulai terbentuk saat pendinginan yang bertransformasi dari austenit menjadi *ferrite* yang tumbuh menyebar di sepanjang batas butir [29], [30]. Perbedaan morfologi butir disebabkan oleh perbedaan *heat input* dan waktu pengelasan. Pengaruh perbedaan *heat input* ini menyebabkan perbedaan fasa di HAZ dan *weld metal* [26]. Peningkatan *heat input* menyebabkan perubahan siklus termal selama pengelasan yang mempengaruhi morfologi struktur mikro, sehingga dapat mempengaruhi ketangguhan *impact*. Hal ini bisa disebabkan oleh *heat input* yang mencukupi untuk nukleasi *ferrite* sehingga membentuk *acicular ferrite* yang dapat menghambat perambatan retak yang meningkatkan ketangguhan *impact* dan columnar grain yang mengikuti arah solidifikasi.

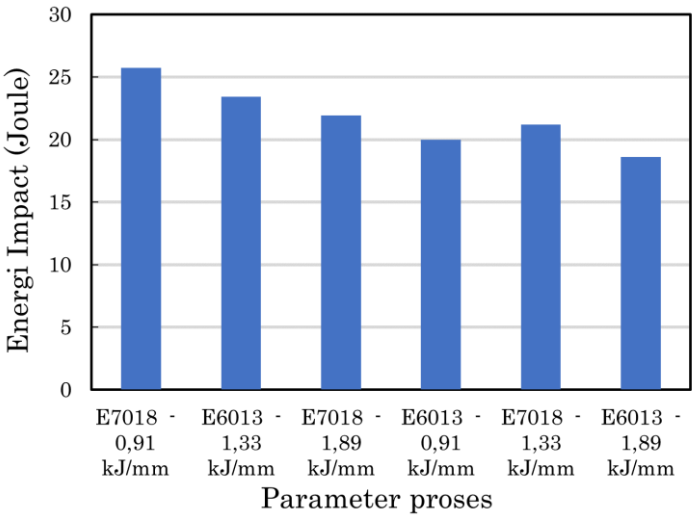
Analisis Hasil Pengujian Ketangguhan *Impact*

Gambar 5 menunjukkan hasil ketangguhan *impact* SMAW *weld metal* baja karbon ASTM A36 pada temperatur ruang mengalami penurunan dengan meningkatnya *heat input*. Pada *heat input*

0,91 kJ/mm tampak ketangguhan *impact* yang tinggi karena penetrasi dan fusi yang optimal dan hmogen. Selain itu, peningkatan *heat input* mempengaruhi siklus termal dan waktu pendinginan sehingga menentukan transformasi fasa dari *austenite* menjadi *ferrite*, *Widmanstätten ferrite, acicular ferrite*. Peningkatan *heat input* menghasilkan perubahan pada siklus termal yang mempengaruhi pembentukan morfologi Widmanstätten *ferrite*. Perubahan morfologi tersebut dapat memengaruhi perilaku perambatan retak. Wu dkk. [31] menjelaskan *heat input* mempengaruhi pembentukan struktur mikro *acicular ferrite* yang berpengaruh pada ketangguhan *impact*. Kumar dkk. [32] juga menjelaskan pengaruh *heat input* pengelasan terhadap ketangguhan *impact* pada CGHAZ baja HY-85.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan *heat input* menyebabkan pembesaran ukuran butir dan perubahan struktur mikro, sehingga ketangguhan *impact* menurun. Korkmaz dkk. [33] menjelaskan bahwa nilai ketangguhan pada *weld metal* yang tidak terlalu jauh dari *base metal* bisa disebabkan pembentukan *acicular ferrite* pada *weld metal* menghambat retak mikro yang dapat meningkatkan nilai ketangguhan. Selain itu, Dong dkk. [34] juga menjelaskan bahwa *acicular ferrite* menghambat penyebaran retak mikro, sehingga mempengaruhi nilai ketangguhan *impact*. Berdasarkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 5, terlihat juga bahwa spesimen yang dilas menggunakan elektroda E7018 menunjukkan nilai ketangguhan *impact* yang lebih tinggi dibandingkan dengan elektroda E6013. Hal ini disebabkan oleh perbedaan komposisi fluks antara elektroda E7018 dan E6013 yang dapat mempengaruhi mekanisme solidifikasi dan transformasi fasa pada logam las, yang selanjutnya menentukan transformasi struktur mikro serta menentukan sifat mekanik seperti ketangguhan *impact* sambungan las [35]. Luo dkk. [36] juga menyebutkan bahwa modifikasi komposisi elektroda seperti titanium oksida mempengaruhi perubahan struktur mikro dan meningkatkan ketangguhan *impact*. Kandungan hidrogen yang rendah pada elektroda E7018 dapat mengurangi terjadinya retak hidrogen.

Flux pada elektroda E7018 mengandung *iron powder* yang mampu menghasilkan *slag* tebal yang berfungsi menutup logam cair dan mampu mengontrol laju pendinginan menjadi lebih lambat. *Flux* tersebut juga menghasilkan inklusi oksida seperti MnO, SiO_2 dan Al_2O_3 yang berfungsi sebagai *nucleation site* yang tumbuh menjadi banyak titik nukleasi *ferrite* dan kemudian membentuk *acicular ferrite* saling bersilangan yang membuat struktur mikro lebih halus dan homogen sehingga dapat menghambat perambatan retak dan dapat meningkatkan sifat ketangguhan logam. Sedangkan elektroda E6013 tidak mengandung *iron powder* sehingga menghasilkan slag yang lebih tipis dan menghasilkan *heat input* yang relatif lebih rendah. Selain itu, E6013 merupakan *rutile coating* yang menghasilkan inklusi TiO_2 yang dapat menghasilkan *nucleation site* dengan jumlah sedikit yang kemudian tumbuh menjadi *ferrite* dan *Widmanstätten ferrite*. Selanjutnya, setelah *ferrite* terbentuk, sisa austenite berubah menjadi *pearlite* selama



Gambar 5. Hasil pengujian ketangguhan *impact* terhadap variasi *heat input* dan elektroda

pada baja ASTM A36 menggunakan tiga kali replikasi pendinginan, sehingga bertambahnya jumlah *grain boundary*, yang berakibat pada memudahkan perambatan retak, mengakibatkan nilai ketangguhan *impact* menjadi lebih rendah. Wang dkk. [37] menjelaskan pada *heat input* tinggi struktur mikro didominasi oleh *grain boundary ferrite* yang menurunkan ketangguhan *impact*. Liu dkk. [38] juga menganalisis perubahan struktur mikro karena pengaruh dari perbedaan variasi *heat input*, di mana peningkatan *heat input* menyebabkan pertumbuhan ukuran butir disertai pembentukan *grain boundary ferrite* yang menyebabkan ketangguhan *impact* mengalami penurunan drastis.

KESIMPULAN

Berdasarkan percobaan, hasil pengujian, analisis data, dan pembahasan penelitian pengaruh variasi *heat input* dan elektroda terhadap struktur mikro dan ketangguhan *impact* pada sambungan las *butt joint* SMAW baja karbon ASTM A36, dapat disimpulkan bahwa parameter pengelasan seperti *heat input* dan jenis elektroda memiliki pengaruh terhadap kualitas sambungan las dan potensi terbentuknya cacat pengelasan. Penggunaan elektroda E7018 cenderung menghasilkan kualitas pengelasan yang lebih baik daripada elektroda E6013. Cacat pengelasan yang terdeteksi berupa porositas yang masih dapat ditoleransi sesuai standar AWS D1.1. Kenaikan *heat input* mempengaruhi perubahan struktur mikro *heat affected zone* (HAZ) dan *weld metal*. Struktur mikro *weld metal* yang terbentuk menggunakan elektroda E7018 dan E6013 pada *heat input* 0,912 kJ/mm didominasi oleh *acicular ferrite*. Kenaikan *heat input* pada kedua elektroda didominasi oleh *ferrite* kasar, Widmanstätten *ferrite* dan *grain boundary ferrite*. Jenis elektroda berpengaruh terhadap pembentukan struktur mikro dan ketangguhan *impact* sambungan las. Ketangguhan *impact* cenderung menurun dengan kenaikan *heat input*. Selain itu, elektroda E7018 menghasilkan ketangguhan *impact* yang lebih tinggi dibandingkan dengan elektroda E6013.

DAFTAR PUSTAKA

[1] S. Kou, *Welding Metallurgy*, Wiley, Hoboken, USA, 2020.

[2] R. Chiong, N. Khandoker, S. Islam, and E. Tchan, "Effect of SMAW Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of AISI 1018 Low Carbon Steel Joints: An Experimental Approach," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 495, no. 1, Article 012093, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/495/1/012093

[3] S. Dewangan *et al.*, "Metallographic Investigation on Postweld Heat-Treated 0.21%C-1020 Steel Plates Joined by SMAW Method," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2022, no. 1, Article 9377591, 2022, doi: 10.1155/2022/9377591

[4] P. Hariprasath, P. Sivaraj, V. Balasubramanian, S. Pilli, and K. Sridhar, "Effect of The Welding Technique on Mechanical Properties and Metallurgical Characteristics of The Naval Grade High Strength Low Alloy Steel Joints Produced by SMAW and GMAW," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 37, pp. 584–595, 2022, doi: 10.1016/ j.cirpj.2022.03.007

[5] A. Sadeghi, A. Moloodi, M. Golestanipour, and M. M. Shahri, "An Investigation of Abrasive Wear and Corrosion Behavior of Surface Repair of Gray Cast Iron by SMAW," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 90–95, 2017, doi: 10.1016/j.jmrt. 2016.09.003

[6] A. S. Darmawan *et al.*, "Effect of Shielded Metal Arc Welding on Microstructure, Hardness, and Tensile Strength of Nodular Cast Iron," *Advances in Science and Technology*, vol. 141, pp. 21–26, 2024, doi: 10.4028/p-2gxSXr DOI link

[7] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, *6th ed.*, Pearson Education, London, United Kingdom, 2017.

[8] D. Pathak, R. P. Singh, S. Gaur, and V. Balu, "Experimental Investigation of Effects of Welding Current and Electrode Angle on Tensile Strength of Shielded Metal Arc Welded Low

Carbon Steel Plates," *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 929–931, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.01.146

[9] M. Fitri, P. Hidayatulloh, K. Wibowo, and A. Darmawan, "The Effect of SMAW Welding Currents on Mechanical Properties and Micro Structures of Low Carbon Steels," *Materials Science Forum*, vol. 1029, pp. 15–23, 2021, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1029.15

[10] L. Zhang, Y. Li, J. Wang, and Q. Jiang, "Effect of Acicular Ferrite on Cracking Sensibility in The Weld Metal of Q690+Q550 High Strength Steels," *ISIJ International*, vol. 51, pp. 1132–1136, doi: 10.2355/isijinternational.51.1132

[11] Suharno, M. R. Fikri, N. A. Pambudi, B. Harjanto, Jumintono, and R. Rizkiana, "The Effect Of Variation of The Electric Current on Physical and Mechanical Properties in A36 Steel Welding," *Welding International*, vol. 37, no.10, pp. 553–562, 2023, doi: 10.1080/09507116. 2023.2264175

[12] I. R. Awad, H. A. Abdel-Aleem, A. Gaafer, and M. Khedr, "Influence of GTAW and SMAW Techniques on The Mechanical Behavior of S275JR Low Carbon Manganese Steel Welded Joints," *Procedia Structural Integrity*, vol. 68, pp. 1024–1030, 2025, doi: 10.1016/j.prostr. 2025.06.165

[13] T. Kharanan *et al.*, "The Influence of Welding Techniques on The Mechanical Characteristics and Microstructural Features of Microalloyed Steel," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 39, no. 12, pp. 7531–7541, 2025, doi: 10.1007/s12206-025-1118-0

[14] N. S. Wardhani and A. Mokhtar, "Pengaruh Variasi Arus Pengelasan SMAW pada Material Baja SS400 terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro," *TURBINE: Jurnal Teknik Mesin*, vol. 4. no.2, pp. 282–296, 2025.

[15] S. Mishra and R. Chhibber, "Investigations of Mechanical, Microstructural, and Corrosion Properties of Dissimilar Welds Between DSS 2205 and X70 Using Shielded Metal Arc Welding," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2026, doi: 10.1177/14644207261443631

[16] M.A. Rosadi, A. Suprihanto, F.X.A. Wahyudianto, A. Hariyanto, and A. Muis, "Pengaruh Pengelasan SMAW dengan Variasi Elektroda E6013 dan E7016 terhadap Kekuatan Tarik dan Kekerasan pada Baja SS400," *Simetris: Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro dan Ilmu Komputer*, vol. 17, no. 1, pp. 39–48, 2026, doi: 10.24176/simet.v17i1.17004.

[17] C. Hellier, Handbook of Nondestructive Evaluation, Second Edition (McGraw-Hill handbooks). McGraw-Hill Education, 2013.

[18] ASM Handbook (ASM Handbook). ASM International, 1990.

[19] H. B. Cary and S. C. Helzer, *Modern Welding Technology,* Pearson Education, London, United Kingdom, 2011.

[20] J. F. Lancaster, *The Physics of Welding: International Institute of Welding,* Pergamon Press, Oxford, United Kingdom, 2013.

[21] J. Jaidi and P. Dutta, "Three-Dimensional Turbulent Weld Pool Convection in Gas Metal Arc Welding Process," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 9, no. 5, pp. 407–414, 2004, doi: 10.1179/136217104225021814.

[22] M. R. U. Ahsan, Y. R. Kim, C. H. Kim, J. W. Kim, R. Ashiri, and Y. D. Park, "Porosity Formation Mechanisms in Cold Metal Transfer (CMT) Gas Metal Arc Welding (GMAW) of Zinc Coated Steels," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 21, no. 3, pp. 209–215, 2016, doi: 10.1179/1362171815Y.0000000084.

[23] S. American Welding, *AWS D1.1/D1.1M: Structural Welding Code – Steel: American Welding Society*, Miami, USA, 2020.

[24] T. Endramawan and A. Sifa, "Non Destructive Test Dye Penetrant and Ultrasonic on Welding SMAW Butt Joint with Acceptance Criteria ASME Standard," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 306, no. 1, Article 012122, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/306/1/012122.

[25] M. M. Kantor, V. V. Sudin, V. A. Bozhenov, and K. A. Solntsev, "Microstructure and Impact Toughness of Acicular Ferrite in Low Alloy Steel Weld Joints from Results of Multiple Impact Bending Tests," *Inorganic Materials*, vol. 59, no. 4, pp. 436–451, 2023, doi: 10.1134/ S0020168523040027.

[26] Z. Zhu *et al.*, "Effect of Heat Input on The Metal Microstructure and Mechanical Properties of Q960 High-Strength Steel Solid Core Welding Wire," *Steel Research International,* vol. 95, no. 8, Article 2400060, 2024, doi: 10.1002/srin.202400060.
[27] W. L. Costin, O. Lavigne, and A. Kotousov, "A Study on The Relationship Between Microstructure and Mechanical Properties of Acicular Ferrite and Upper Bainite," *Materials Science and Engineering: A,* vol. 663, pp. 193–203, 2016, doi: 10.1016/j.msea.2016.03.103.
[28] L. Cho, A. Tselikova, K. Holtgrewe, E. De Moor, R. Schmidt, and K. O. Findley, "Critical Assessment 42: Acicular Ferrite Formation and Its Influence on Weld Metal and Heat-Affected Zone Properties of Steels," *Materials Science and Technology*, vol. 38, no. 17, pp. 1425–1433, 2022, doi: 10.1080/02670836.2022.2088163.
[29] L. Cheng, X. L. Wan, and K. M. Wu, "Three-Dimensional Morphology of Grain Boundary Widmanstätten Ferrite in A Low Carbon Low Alloy Steel," *Materials Characterization*, vol. 61, no. 2, pp. 192–197, 2010, doi: 10.1016/j.matchar.2009.11.009.
[30] N. Ali *et al.,* "Effect Of Soft Reduction Technique on Microstructure and Toughness of Medium Carbon Steel," *Materials Today Communications*, vol. 26, Article 102130, 2021, doi: 10.1016/j.mtcomm.2021.102130
[31] J. Wu *et al.*, "Welding Heat Input Effect on Microstructure and Toughness of Coarse-Grained Heat-Affected Zone in V-Ti-N-Nb Microalloyed Weathering Steel," *Materials Today Communications*, vol. 51, Article 114867, 2026, doi: 10.1016/j.mtcomm.2026.114867.
[32] S. Kumar and S. K. Nath, "Effect of Heat Input on Impact Toughness in Transition Temperature Region of Weld CGHAZ of A HY 85 Steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 236, pp. 216–224, 2016, https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.05.018.
[33] E. Korkmaz and C. Meran, "Mechanical Properties and Microstructure Characterization of GTAW of Micro-Alloyed Hot Rolled Ferritic XPF800 steel," *Engineering Science and Technology*, vol. 24, no. 2, pp. 503–513, 2021, doi: 10.1016/j.jestch.2020.04.006.
[34] H. Dong, X. Hao, and D. Deng, "Effect of Welding Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of HSLA Steel Joint," *Metallography, Microstructure, and Analysis*, vol. 3, no. 2, pp. 138–146, 2014, doi: 10.1007/s13632-014-0130-z
[35] J. F. Lancaster, *Metallurgy of Welding*, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 1999.
[36] X. Luo, Z. Wang, X. Chen, Y. Wang, and G. Xu, "Modifying of Microstructure and Toughness in The Weld Metal Prepared by Welding Wire Containing Nanosized Titanium Oxides," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 807, Article 140897, 2021, doi: 10.1016/j.msea.2021.140897
[37] L. Wang, Y. Jiang, C. Hu, X. Wan, and G. Li, "Effect of Heat Input on Microstructure Evolution and Fracture Toughness of Interlayer Heat Affected Zone in Ultra-High Strength Steel," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 39, pp. 5189–5198, 2025, doi: 10.1016/j.jmrt.2025.10.201
[38] D. Liu *et al.,* "Effect of Welding Heat Input on the Microstructure and Impact Toughness of HAZ in 420 MPa-grade offshore engineering steel", *Frontiers in Materials*, vol. 8, Article 694586, 2021, doi: 10.3389/fmats.2021.694586.