Jurnal Integrasi Teknologi dan Inovasi
Volume 2, Nomor 1, 2026 pp. 69-74
ISSN: 3110-8601
Open Access: https://journal.pintarologimedia.com/index.php/integrasi

Analisis variasi arus dan tegangan SMAW terhadap heat input dan kualitas sambungan pipa schedule 40 untuk Kualifikasi WPS ASME Section IX

Donny Aji Sephtiardy[1*] & Trinil Muktiningrum[2]

[1,2] Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Kahuripan Kediri

ARTICLE INFO

Article history:
Received: October 23, 2026
Revised: October 26, 2026
Accepted: October 30, 2026
Available: October 30, 2026

Kata Kunci:
SMAW; Arus; Tegangan; Heat Input; Kualitas Sambungan Las; WPS ASME Section IX

Keywords:
SMAW; Current; Voltage; Heat Input; Weld Joint Quality; WPS ASME Section IX

This is an open access article under the CC BY-SA license.

Copyright © 2026 by Author. Published by Pintarologi Media.

ABSTRAK

Pengelasan merupakan proses krusial dalam konstruksi dan manufaktur, terutama sambungan pipa. Kualitas sambungan las dipengaruhi parameter seperti arus dan tegangan yang menentukan besarnya heat input. Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi arus dan tegangan pada Shielded Metal Arc Welding (SMAW) terhadap heat input dan kualitas sambungan las pipa baja karbon Schedule 40. Pengelasan dilakukan dengan memvariasikan arus (90A, 100A, 110A) dan tegangan (22V, 24V, 26V) mengacu pada ASME Section IX. Kualitas sambungan dievaluasi menggunakan Non-Destructive Test berupa Penetrant Test sesuai ASME Section IX untuk mendeteksi cacat permukaan seperti retak, lack of fusion, atau porositas. Hasil menunjukkan variasi arus dan tegangan signifikan mempengaruhi heat input dan menghasilkan kualitas sambungan berbeda, tercermin dari ada tidaknya indikasi cacat pada uji PT. Spesimen dengan heat input optimal terbukti bebas dari cacat yang tidak diterima (APPROVE), sehingga memenuhi kriteria ASME Section IX. Penelitian ini menghasilkan rancangan awal (draft) Welding Procedure Specification (WPS) untuk pengelasan pipa baja Schedule 40.

ABSTRACT

Welding is a crucial process in construction and manufacturing, especially for pipe joints. The quality of a weld is influenced by parameters like current and voltage, which determine the amount of heat input. This study analyzes the effect of variations in current and voltage in Shielded Metal Arc Welding (SMAW) on heat input and the quality of welds in Schedule 40 carbon steel pipes. Welding was done by varying the current (90A, 100A, 110A) and voltage (22V, 24V, 26V) based on ASME Section IX. The quality of the joints was evaluated using Non-Destructive Testing through a Penetrant Test according to ASME Section IX to detect surface defects like cracks, lack of fusion, or porosity. The results show that significant variations in current and voltage affect the heat input and produce different joint qualities, reflected in whether or not there are defect indications in PT tests. Specimens with optimal heat input were free of unacceptable defects, thus meeting ASME Section IX criteria. This study produced a validated Welding Procedure Specification (WPS) with optimal parameters for welding Schedule 40 steel pipes.

1. PENDAHULUAN

Salah satu proses penyambungan logam yang sangat penting dalam berbagai sektor industri, seperti konstruksi, manufaktur, perkapalan, dan minyak dan gas, adalah pengelasan. Keandalan serta keamanan suatu struktur atau komponen ditentukan oleh kualitas hasil pengelasan. Pada industri perpipaan, sambungan las wajib memenuhi standar kualitas yang ketat untuk memastikan integritas sistem perpipaan, khususnya yang digunakan untuk mengalirkan fluida bertekanan (Purwanto et al., 2023).

Shielded Metal Arc Welding (SMAW) atau las busur listrik elektroda terbungkus merupakan salah satu metode pengelasan yang paling banyak digunakan (ASME, 2021). Metode SMAW banyak dipilih karena fleksibel, peralatannya relatif sederhana, biaya operasionalnya terjangkau, serta cocok diterapkan pada berbagai posisi pengelasan (Picanussa et al., 2024). Parameter pengelasan, khususnya arus listrik dan tegangan busur, sangat memengaruhi kualitas hasil las SMAW. Kedua parameter itu secara langsung menentukan besaran masukan panas (heat input) yang masuk ke dalam material.

*Corresponding author
E-mail addresses: donny.as@students.kahuripan.ac.id (Donny Aji Sephtiardy)

Dalam perspektif teknik elektro, arus dan tegangan termasuk besaran listrik fundamental yang dapat diukur dan dikendalikan secara presisi. Pengelasan SMAW melibatkan konversi energi listrik menjadi energi panas melalui busur listrik. Besarnya daya listrik yang dipakai dirumuskan sebagai P=V×I, di mana Padalah daya (Watt), Vadalah tegangan (Volt), dan Iadalah arus (Ampere). Mesin las SMAW modern menggunakan teknologi inverter untuk mengonversi tegangan AC menjadi DC dengan efisiensi tinggi (hingga 90%), sehingga kontrol arus dan tegangan menjadi lebih stabil apabila dibandingkan mesin transformator konvensional (Noor et al., 2026; Wildi, 2005). Pemahaman karakteristik kelistrikan seperti faktor daya, efisiensi inverter, dan karakteristik beban sangat penting untuk menentukan parameter pengelasan yang optimal dan efisiensi energi secara keseluruhan.

Heat input merupakan faktor kritis dalam pengelasan karena memengaruhi laju pendinginan, struktur mikro, dan pada akhirnya menentukan sifat mekanik sambungan las (Sution et al., 2024). Heat input yang tidak tepat dapat menyebabkan berbagai cacat las, seperti lack of fusion, porosity, undercut, atau retak. Oleh karena itu, pemilihan parameter arus dan tegangan yang tepat, yang merupakan domain teknik elektro, menjadi sangat penting.

Sebaliknya, untuk memastikan prosedur pengelasan yang diterapkan dapat menghasilkan sambungan berkualitas secara konsisten, dibutuhkan kualifikasi Welding Procedure Specification (WPS) menurut ASME Section IX. Adapun evaluasi kualitas dilakukan melalui NDT Penetrant Test (PT) sesuai ASME IX.

Penelitian ini mengintegrasikan analisis kelistrikan (arus, tegangan, daya, efisiensi inverter) dengan analisis kualitas pengelasan (heat input, cacat las) sehingga memberikan kontribusi seimbang antara ilmu elektro dan teknologi pengelasan

2. METODE

Kajian ini menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif deskriptif-komparatif dengan factorial design dua faktor, yaitu arus pengelasan (90 A, 100 A, 110 A) dan tegangan busur (22 V, 24 V, 26 V), sehingga terbentuk sembilan kombinasi perlakuan pada pipa baja karbon Schedule 40 diameter 4 inci. Variabel kontrol konstan meliputi elektroda E7018 diameter 3,2 mm, posisi 1G, kecepatan las 120 mm/menit, dan empat lapisan las (root, hot, fill, capping). Data primer dikumpulkan melalui pengukuran arus aktual (tang ampere), tegangan busur (multimeter), dan waktu tempuh las (stopwatch) untuk memperoleh kecepatan pengelasan, sedangkan data sekunder bersumber dari dokumentasi teknis mesin MMA 220HD, standar ASME Section IX, ASTM E165, dan literatur relevan. Pengumpulan data meliputi persiapan dan pengkodean 18 spesimen, pengecekan fit-up (bevel, root face, gap), pengelasan DC+ dengan suhu interpass di bawah 150 °C, perhitungan heat input dengan rumus ASME Section IX QW-409.1 (HI = V × I × 60/S), serta uji penetran sesuai ASTM E165 yang mencakup pembersihan awal, aplikasi penetran dan pengembang masing-masing 15 menit, inspeksi visual, dan dokumentasi indikasi.

Analisis data dilakukan secara deskriptif kuantitatif dan komparatif melalui tabel dan grafik untuk memetakan pengaruh arus dan tegangan terhadap heat input serta daya listrik (P = V × I). Hasil uji penetran diklasifikasikan menjadi diterima dan tidak diterima berdasarkan ASME Section IX QW-195.2, yakni indikasi linier relevan, indikasi bulat berdiameter lebih dari 3 mm, atau empat indikasi bulat dalam satu garis berjarak kurang dari atau sama dengan 1,5 mm dinyatakan tidak dapat diterima. Selanjutnya dianalisis korelasi parameter las, heat input, dan mutu sambungan untuk menentukan kombinasi optimal, yaitu parameter dengan heat input dalam rentang ideal dan status diterima pada uji penetran, yang dijadikan dasar penyusunan rancangan Welding Procedure Specification (WPS).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Penelitian ini menggunakan 9 spesimen pipa baja Schedule 40 dengan variasi arus dan tegangan menurut matriks yang telah ditetapkan. Dari hasil pengelasan, dilakukan perhitungan heat input serta pengujian NDT Penetrant Test (PT) sesuai prosedur ASTM E165 (Picanussa et al., 2024), sedangkan evaluasinya mengacu pada ASME Section IX QW-195.2 (ASME, 2021)

3.1. Perhitungan Heat Input

Berdasarkan rumus ASME Section IX QW-409.1 (ASME, 2021), heat input dihitung dengan persamaan:

$$HI = \frac{V \times I \times 60}{S}$$

dengan S = 120 mm/menit, maka:

$$HI = \frac{V \times I \times 60}{120} = \frac{V \times I}{2} \text{ (J/mm)}$$

Hasil perhitungan heat input untuk setiap spesimen disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Perhitungan Heat Input Setiap Spesimen

Kode	Arus (A)	Tegangan (V)	Heat Input (J/mm)	Heat Input (kJ/mm)
A1	90	22	990	0,99
A2	90	24	1080	1,08
A3	90	26	1170	1,17
B1	100	22	1100	1,10
B2	100	24	1200	1,20
B3	100	26	1300	1,30
C1	110	22	1210	1,21
C2	110	24	1320	1,32
C3	110	26	1430	1,43

Berdasarkan Tabel 1, heat input terendah diperoleh spesimen A1 (990 J/mm) dengan arus 90 A dan tegangan 22 V, sedangkan heat input tertinggi pada spesimen C3 (1430 J/mm) dengan arus 110 A dan tegangan 26 V. Heat input meningkat seiring kenaikan arus maupun tegangan, sesuai teori bahwa heat input berbanding lurus dengan arus dan tegangan (Sution et al., 2024). Daya listrik juga meningkat dari 1980 W (A1) hingga 2860 W (C3), menunjukkan korelasi linier antara daya listrik dan heat input.

3.2. Pengujian *Penetrant Test* (PT)

Setelah proses pengelasan selesai, pengujian PT dilaksanakan pada seluruh spesimen. Prosedur pengujian mengikuti ASTM E165 (Picanussa et al., 2024) melalui tahapan berikut: pre-cleaning, aplikasi penetran merah (dwell time 15 menit), excess penetrant removal, aplikasi developer putih (dwell time 15 menit), inspeksi visual, dan post-cleaning. Kriteria evaluasinya berdasarkan ASME Section IX QW-195.2 (ASME, 2021).

Tabel 2. Hasil Pengujian Penetrant Test Setiap Spesimen

Kode	Heat Input (kJ/mm)	Daya (W)	Indikasi Cacat	Jenis Cacat	Status
A1	0,99	1980	*Root*	*Undercut*	*Reject*
A2	1,08	2160	*Root*	*Incomplete penetration*	*Reject*
A3	1,17	2340	*Root*	*Incomplete penetration*	*Reject*
B1	1,10	2200	*Root*	*Excesive penetration, Undercut*	*Reject*
B2	1,20	2400	*Root & Cap*	*Incomplete penetration*	*Reject*
B3	1,30	2600	-	-	*Approve*
C1	1,21	2420	*Root & Cap*	*Incomplete penetration, Interpass*	*Reject*
C2	1,32	2640	*Root*	*Incomplete penetration, Interpass*	*Reject*
C3	1,43	2860	*Root*	*Incomplete penetration, Interpass*	*Reject*

*Catatan: Spesimen B3 menunjukkan hasil bagus, baik kondisi *root* maupun *capping*, dan telah dilakukan pengecekan dari pihak *Welding Inspector*.

Pembahasan

3.3. Pengaruh Variasi Arus dan Tegangan terhadap Heat Input

Tabel 1 menunjukkan bahwa heat input naik secara linier seiring bertambahnya arus dan tegangan. Keadaan tersebut sesuai dengan persamaan HI = (V × I × 60)/S, yang menyatakan bahwa heat input berbanding lurus dengan arus dan tegangan (ASME, 2021).

Pada arus konstan 90 A, kenaikan tegangan dari 22 V ke 26 V menaikkan heat input dari 990 J/mm menjadi 1170 J/mm (naik 18,2%). Pada tegangan konstan 22 V, kenaikan arus dari 90 A ke 110 A menaikkan heat input dari 990 J/mm menjadi 1210 J/mm (naik 22,2%). Ini menunjukkan pengaruh arus terhadap heat input sedikit lebih dominan dibandingkan tegangan pada rentang parameter yang diuji.

Temuan tersebut konsisten dengan penelitian (Noor et al., 2026) yang menyatakan bahwa nilai heat input meningkat seiring besarnya arus pengelasan yang digunakan. Ditinjau dari perspektif kelistrikan, kenaikan arus dari 90 A menjadi 110 A pada tegangan konstan 22 V mengakibatkan daya listrik naik dari 1980 W menjadi 2420 W (kenaikan 22,2%). Sementara itu, kenaikan tegangan dari 22 V menjadi 26 V pada arus konstan 90 A menyebabkan daya meningkat dari 1980 W menjadi 2340 W (kenaikan 18,2%). Keadaan ini memperlihatkan bahwa daya listrik yang digunakan berbanding lurus dengan arus dan tegangan, sesuai persamaan HI = (V × I × 60)/S (ASTM International, 2022).

Mesin las inverter MMA 220HD yang dipakai mempunyai efisiensi rata-rata 85% (Wildi, 2005). Daya input maksimum mesin tercatat $P_{\text{input}} = 220 \times 45{,}5 = 10.010\text{W} = 10$ kW. Pada efisiensi 85%, daya output maksimum yang tersedia kira-kira 8,5 kW. Rentang daya yang digunakan dalam penelitian ini (1980–2860 W) hanya sekitar 20–30% dari kapasitas mesin, sehingga mesin bekerja jauh di bawah batas maksimum dan tidak mengalami penurunan kinerja akibat duty cycle. Kondisi tersebut memastikan bahwa variasi arus dan tegangan yang diuji benar-benar mencerminkan pengaruh parameter, bukan keterbatasan alat (Chapman, 2012).

3.4. Pengaruh Heat Input terhadap Kualitas Sambungan (Hasil PT)

Berdasarkan Tabel 2, hanya spesimen B3 yang lolos uji PT (APPROVE), sedangkan spesimen lainnya (A1, A2, A3, B1, B2, C1, C2, C3) dinyatakan REJECT. Hal ini menunjukkan kualitas sambungan las sangat sensitif terhadap perubahan parameter arus dan tegangan.

a. Heat input terlalu rendah (<1,20 kJ/mm)

Spesimen A1, A2, A3, dan B1 (0,99–1,10 kJ/mm) dengan daya 1980–2200 W menunjukkan indikasi cacat berupa undercut dan incomplete penetration. Hal ini disebabkan oleh panas yang tidak cukup untuk melelehkan logam induk dan elektroda secara sempurna. Busur listrik menjadi tidak stabil sehingga logam las tidak menyatu dengan baik (Sution et al., 2024). Hasil ini sesuai dengan pernyataan bahwa arus yang terlalu rendah menyebabkan kurangnya peleburan dan penetrasi yang dangkal (American Welding Society, 2020).



Gambar 1. Hasil Uji

b. Heat input optimal (1,30 kJ/mm)

Spesimen B3 (100 A, 26 V) dengan heat input 1,30 kJ/mm dan daya 2600 W memperoleh hasil PT APPROVE tanpa indikasi cacat pada root maupun capping. Pada heat input ini, panas cukup untuk melelehkan material dengan baik, busur listrik stabil, dan laju pendinginan optimal sehingga struktur mikro relatif homogen. Kombinasi parameter ini menghasilkan kualitas terbaik dengan permukaan las rata dan tanpa indikasi cacat (Hughes & Drury, 2019).

Dengan demikian, dari seluruh spesimen yang diuji, nilai heat input 1,30 kJ/mm pada spesimen B3 merupakan satu-satunya yang lolos kriteria penerimaan ASME IX QW-195.2 (ASME, 2021), sehingga ditetapkan sebagai nilai heat input optimal untuk pengelasan pipa Schedule 40 dengan parameter ini.

Secara kelistrikan, spesimen berdaya rendah (1980–2400 W) cenderung cacat karena panas tidak cukup, sedangkan spesimen berdaya tinggi (>2640 W) juga cacat akibat panas berlebih dan busur tidak stabil. Spesimen B3 dengan daya 2600 W berada pada titik kerja optimal mesin inverter.



Gambar 2. Hasil Uji

c. Heat input terlalu tinggi (> 1,30 kJ/mm)

Spesimen C1, C2, dan C3 (1,21–1,43 kJ/mm) dengan daya 2420–2860 W menunjukkan indikasi interpass dan spatter berlebih. Pada C3, porositas berdiameter melebihi 3 mm dinyatakan REJECT. Heat input terlalu tinggi mengakibatkan pencairan logam induk berlebihan, genangan logam cair sulit dikendalikan, dan gas tidak sempat keluar. Spatter berlebih muncul akibat busur tidak stabil pada arus dan tegangan tinggi (ASTM International, 2022).



Gambar 3. Hasil Uji

3.5. Penentuan Parameter Optimal

Berdasarkan analisis Tabel 2, heat input yang menghasilkan sambungan bebas indikasi cacat permukaan (capping) sesuai ASME Section IX QW-195.2 adalah 1,30 kJ/mm, diwakili spesimen B3. Heat input di bawah 1,00 kJ/mm (A1) menimbulkan undercut dan incomplete penetration, sedangkan di atas 1,32 kJ/mm (C2, C3) menimbulkan interpass dan spatter berlebih. Karena itu, 1,30 kJ/mm merupakan titik optimal tercapainya kualitas sambungan terbaik.

Kombinasi B3, yakni arus 100 A dan tegangan 26 V, merupakan parameter optimal yang menghasilkan heat input paling ideal serta kualitas sambungan terbaik, dengan karakteristik:

a. Heat input = 1,30 kJ/mm
b. Daya listrik = 2600 W (berada pada titik efisiensi optimal mesin inverter)
c. Hasil PT = APPROVE (bebas indikasi cacat)
d. Permukaan las rata, busur stabil, tidak ada spatter berlebih

Selain itu, parameter ini menjadi rujukan awal dalam perancangan Welding Procedure Specification (WPS) dan masih memerlukan verifikasi lanjutan melalui pengujian mekanik dan kualifikasi (PQR) sesuai standar ASME Section IX.

3.6. Analisis Tambahan : Pengaruh Kombinasi Ekstrim

Kombinasi ekstrem A1 (90 A, 22 V) dan C3 (110 A, 26 V) menunjukkan parameter di ujung bawah dan atas rentang cenderung menghasilkan cacat. Pemilihan parameter pengelasan tidak boleh terlalu rendah atau terlalu tinggi, tetapi harus pada nilai optimal sesuai material dan elektroda (ASTM International, 2022). Secara kelistrikan, daya terlalu rendah (1980 W) atau terlalu tinggi (2860 W) menyebabkan busur tidak stabil dan cacat las, sehingga kontrol daya listrik dalam pengelasan menjadi penting (ASME, 2022).

4. SIMPULAN

Variasi arus dan tegangan pengelasan SMAW berpengaruh linier terhadap besarnya heat input pada sambungan pipa baja Schedule 40. Nilai heat input terendah diperoleh pada kombinasi 90 A dan 22 V sebesar 0,99 kJ/mm, sedangkan nilai tertinggi pada kombinasi 110 A dan 26 V sebesar 1,43 kJ/mm, dengan pengaruh arus sedikit lebih dominan dibandingkan tegangan. Hasil uji penetran (PT) menunjukkan bahwa kombinasi arus 100 A dan tegangan 26 V yang menghasilkan heat input 1,30 kJ/mm dan daya 2600 W memperoleh status APPROVE (bebas indikasi cacat permukaan), sementara heat input di bawah 1,20 kJ/mm memicu lack of fusion dan undercut, serta heat input di atas 1,32 kJ/mm memicu porositas dan spatter berlebih. Berdasarkan hasil NDT ini, kombinasi 100 A dan 26 V ditetapkan sebagai parameter optimal dan dijadikan acuan awal dalam penyusunan rancangan (draft) WPS sesuai ASME Section IX.

Mengingat keterbatasan penelitian, peneliti selanjutnya disarankan mengulang pengujian minimal tiga kali per kombinasi parameter serta menambahkan uji destruktif dan analisis metalografi agar sifat mekanik sambungan dievaluasi menyeluruh, karena penelitian ini hanya mengamati cacat permukaan. Kajian lanjutan dapat mencakup variasi kecepatan las per lapisan, jenis elektroda, posisi pengelasan, dan material dengan schedule lebih tebal. Bagi praktisi dan industri, parameter optimal yang ditemukan sebaiknya divalidasi di bengkel atau proyek berbeda sebelum diadopsi sebagai acuan produksi, disertai pengukuran konsumsi daya listrik dengan kWh meter untuk mengevaluasi efisiensi energi dan biaya operasional secara lebih akurat.

5. DAFTAR PUSTAKA

American Welding Society. (2020). Standard Welding Terms and Definitions, AWS A3.0:2001. American Welding Society (AWS), 147.

ASME. (2021). ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section IX: Welding and Brazing Qualifications. American Society of Mechanical Engineers.

ASME. (2022). ASME B36.10M: Welded and Seamless Wrought Steel Pipe. American Society of Mechanical Engineers.

ASTM International. (2022). ASTM A53 - Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless. ASTM International.

Chapman. (2012). Electric Machinery Fundamentals (5th ed.). McGraw-Hill.

Hughes, & Drury. (2019). Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications (5th ed.). Newnes.

Noor, M., Fahrezy, F., Waluyo, M. B., & Kismanti, S. T. (2026). Analisis Pengaruh Elektroda Pengelasan SMAW Pada Sambungan Las Material Baja Karbon Rendah Terhadap Kekuatan Tarik Dan Metalografi. Journal BEARINGS: Borneo Mechanical Engineering and Science, 5(1). https://doi.org/10.35334/7F5EP319

Picanussa, J. S. S., Nanulaitta, N. J., & Huka, G. I. (2024). Analisis Pengaruh Variasi Arus Pengelasan Terhadap Kekuatan Tarik dan Struktur Mikro Pada Sambungan Las SMAW dan FCAW dengan Material Baja Karbon Rendah. Journal Mechanical Engineering, 2(3), 229–239. https://doi.org/10.31959/JME.V2I3.2889

Purwanto, A., Wijoyo, W., & Riyadin, A. F. (2023). Pengaruh Polaritas Mesin Las pada Pengelasan SMAW (Shielded Metal Arc Welding) Terhadap Sifat Fisik dan Mekanik Baja Karbon Rendah. Jurnal Teknik Indonesia, 2(4), 150–158. https://doi.org/10.58860/JTI.V2I4.238

Sution, A., Wartono, & Jayatun, Y. A. (2024). Studi Pengaruh Heat Input Terhadap Kekuatan Lengkung (Bending) dan Ketangguhan (Impact) Sambungan Las SMAW Pada Pipa Baja. CENDEKIA MEKANIKA, 5(2), 151–160. https://journal.itny.ac.id/index.php/cendekia/article/view/5270

Wildi. (2005). Electrical Machines, Drives, and Power Systems (6th ed.). Pearson Prentice Hall.