SINERGI *Polmed*: JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN
Homepage jurnal: http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/index

KARAKTERISTIK KEKERASAN BAJA ASTM A572 *GRADE* 50 PADA VARIASI ARUS PENGELASAN BUSUR LISTRIK

Frasye Joni Pasau[a]*, Eko Nugroho[a], Manaseh[a], Budha Maryanti[a], Siska Ayu Kartika[a]

[a]*Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Balikpapan, Jl. Pupuk Raya, Gunung Bahagia, Balikpapan 76127, Indonesia*

**Penulis korespondensi: fransyejoni@uniba-bpn.ac.id: fransyejp@gmail.com, (FJ Pasau) Tel.: +62 817-7154-05*

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diajukan pada 14 Agustus 2026
Direvisi pada 27 September 2026
Disetujui pada 14 Oktober 2026
Tersedia daring pada 06 November 2026

Kata kunci:
SMAW, Heat-Affected Zone, kekerasan Vickers, heat input, ASTM A572 Grade 50

Keywords:
SMAW, Heat-Affected Zone, Vickers hardness, heat input, ASTM A572 Grade 50

A B S T R A K

Metode *Shielded Metal Arc Welding* (*SMAW*) merupakan proses penyambungan logam yang lazim diaplikasikan pada konstruksi struktural. Perubahan pada besaran arus las memiliki konsekuensi langsung terhadap *heat input*, siklus termal, dan karakteristik mekanis di zona terpengaruh panas atau *Heat Affected Zone*. Studi eksperimental ini difokuskan untuk mengevaluasi dampak modifikasi kuat arus las terhadap tingkat kekerasan *Heat Affected Zone* pada pelat baja *ASTM A572* Grade 50, yang dirancang khusus untuk struktur ponton *undercarriage*. Eksperimen dilakukan dengan mengatur penggunaan arus pada 90 A, 110 A, serta 130 A, dipadukan dengan kawat las tipe E7018, posisi pengelasan 1G, dan tegangan konstan 23 V. Inspeksi kekerasan *Heat Affected Zone* diukur melalui pengujian Vickers menggunakan beban 0,5 kgf yang ditahan selama 10 detik pada tiga titik uji yang berbeda. Rekaman data menunjukkan rata-rata nilai kekerasan mencapai 156,8 HV untuk arus 90 A, 151,5 HV pada 110 A, dan 143,03 HV pada 130 A. Seiring dengan naiknya arus, heat input turut meningkat secara berurutan menjadi 59,6 kJ/mm, 63,15 kJ/mm, dan 64,1 kJ/mm. Peningkatan kuat arus beserta *heat input* tersebut memicu degradasi nilai kekerasan di area *Heat Affected Zone*. Kesimpulan dari penelitian ini menegaskan bahwa regulasi arus *SMAW* memegang peranan esensial dalam menjaga integritas mekanis *Heat Affected Zone* pada material *ASTM A572* Grade 50.

A B S T R A C T

The Shielded Metal Arc Welding (SMAW) technique is a prevalent joining method in the assembly of structural frameworks. Fluctuations in the welding current directly influence the heat input, thermal cycling, and subsequent mechanical properties within the Heat Affected Zone. The primary objective of this research is to evaluate how modifying the welding current impacts the hardness profile within the Heat Affected Zone of ASTM A572 Grade 50 plates, specifically intended for amphibious undercarriage pontoons. The experimental phase was executed by configuring the currents at 90 A, 110 A, and 130 A, utilizing an E7018 filler metal, a 1G position, and a steady voltage of 23 V. To assess the Heat Affected Zone hardness, a Vickers indenter was employed with an applied load of 0.5 kgf maintained for a duration of 10 seconds across three distinct measurement locations. The empirical data yielded average hardness values of 156.8 HV, 151.5 HV, and 143.03 HV for the respective currents of 90 A, 110 A, and 130 A. As the current scaled up, the calculated heat input also climbed to 59.6, 63.15, and 64.1 kJ/mm. Elevating the electrical current, which consequently raises the thermal input, resulted in a definitive drop in Heat Affected Zone hardness. These findings emphasize that meticulous control over the SMAW current is imperative to preserve the mechanical structural integrity of the HAZ in ASTM A572 Grade 50 steel.

1. PENGANTAR

Kualitas sambungan las merupakan faktor penting dalam menentukan kekuatan, keandalan, dan umur pakai struktur pada industri manufaktur, konstruksi, dan alat berat. Proses pengelasan menghasilkan siklus termal yang dapat mengubah struktur mikro dan sifat mekanis material di sekitar sambungan. Perubahan tersebut menjadi semakin penting pada baja berkekuatan tinggi yang digunakan pada struktur yang menerima beban operasional, sehingga pengendalian parameter pengelasan diperlukan untuk memperoleh karakteristik sambungan yang sesuai (Baghel, 2022).

Metode *Shielded Metal Arc Welding* (*SMAW*) sering menjadi pilihan utama dalam berbagai proyek konstruksi mengingat perangkat yang dibutuhkan cukup praktis, sangat adaptif, dan ideal untuk kebutuhan pabrikasi serta reparasi langsung di lapangan. Faktor-faktor operasional seperti besaran arus, tegangan, klasifikasi kawat las, orientasi pengelasan, beserta laju pergerakan elektroda bertindak sebagai variabel penentu besarnya energi panas (*heat input*) dan profil termal yang terjadi saat proses penyambungan. Modifikasi pada

variabel-variabel ini memberikan implikasi langsung terhadap mutu hasil lasan, tingkat kedalaman penetrasi, profil kekerasan, perubahan struktur mikro, hingga ketangguhan mekanis dari area sambungan (Huda & Alostath, 2022; Prabowo & Sugondo, 2023; Paundra dkk., 2024; Paundra dkk., 2025). Mengacu pada studi yang diinisiasi oleh Paundra dkk. (2024), investigasi terhadap efek perbedaan arus pada teknik *TIG* yang dikombinasikan dengan analisis struktur mikro, uji kekerasan Vickers, dan evaluasi kuat tarik, membuktikan bahwa fluktuasi pada parameter kelistrikan sangat berkorelasi dengan transformasi karakteristik material di area yang dilas.

Arus pengelasan merupakan salah satu parameter utama karena berkaitan langsung dengan energi panas yang masuk ke material. Ketika arus berubah sementara parameter lain dikendalikan, perubahan *heat input* akan mengubah siklus pemanasan dan pendinginan pada daerah di sekitar las. Penelitian pada baja *AISI 1045*, *ASTM A53*, dan *A36* menunjukkan bahwa variasi arus *SMAW* dapat menghasilkan perubahan kekerasan dan karakteristik struktur mikro, meskipun arah dan besarnya perubahan bergantung pada material, elektroda, dan kondisi proses (Muliastri dkk., 2024; Suharno dkk., 2023; Utami dkk., 2025). Temuan Paundra dkk. (2024) pada baja karbon rendah juga memperlihatkan bahwa variasi arus 70–100 A berkaitan dengan perubahan karakteristik hasil pengelasan, termasuk respons kekerasan dan struktur mikro HAZ. Meskipun menggunakan proses TIG, hasil tersebut memberikan dasar bahwa pengaruh arus terhadap *Heat Affected Zone* perlu dianalisis dengan mempertimbangkan kondisi termal dan material yang digunakan.

Heat Affected Zone merupakan daerah yang tidak mengalami peleburan tetapi mengalami perubahan termal akibat proses pengelasan. Respons *Heat Affected Zone* sangat dipengaruhi oleh temperatur puncak, waktu pada temperatur tinggi, dan laju pendinginan. Pada baja berkekuatan tinggi, peningkatan *heat input* dapat menurunkan *microhardness* dan mengubah karakteristik struktur mikro *Heat Affected Zone*; pada kondisi tertentu, peningkatan *heat input* juga dapat memperbesar ukuran butir dan mengubah konstituen struktur mikro yang berpengaruh terhadap sifat mekanis (Mičian dkk., 2021; Stornelli dkk., 2023; Nuryanta dkk., 2024; Pinto Garcia dkk., 2025).

Kajian pada SINERGI Polmed juga menunjukkan bahwa *Heat Affected Zone* merupakan daerah penting dalam evaluasi sifat mekanis sambungan las. Lubis dkk. (2024) Melakukan pengujian Vickers pada *base metal, Heat Affected Zone* , dan *weld zone* untuk mengevaluasi karakteristik kekerasan hasil pengelasan. Penggunaan pengujian Vickers pada daerah *Heat Affected Zone* tersebut memperkuat pendekatan penelitian ini dalam menggunakan kekerasan lokal sebagai indikator perubahan sifat mekanis akibat proses pengelasan. Namun, Lubis dkk. (2024) menggunakan proses *GTAW* pada paduan aluminium dengan variasi f*iller*, sedangkan penelitian ini menggunakan *SMAW* pada *ASTM A572* Grade 50 dengan variasi arus.

Material baja paduan rendah berkekuatan tinggi atau *High-Strength Low-Alloy* (*HSLA*) semacam *ASTM A572* Grade 50 sangat diminati untuk berbagai aplikasi rancang bangun struktural. Hal ini dikarenakan material tersebut menawarkan perpaduan optimal antara ketangguhan mekanis dan kemudahan dalam proses manufakturnya. Investigasi terfokus mengenai spesifikasi baja ini membuktikan adanya korelasi yang signifikan antara pengaturan operasional las *SMAW* dengan tingkat kekerasan (*hardness*) serta terjadinya distorsi sudut (*Angular distortion*). Sejalan dengan hal tersebut, literatur lain yang mengkaji jenis pelat yang sama juga menggarisbawahi peran krusial dari besaran masukan panas (*heat input*) dalam mendefinisikan kualitas akhir dari sebuah sambungan (Díaz Ávila dkk., 2023). Keseluruhan temuan ini mengonfirmasi bahwa penyesuaian pada parameter arus kelistrikan dapat membawa implikasi termal yang memengaruhi kondisi struktur material pada area *Heat Affected Zone*.

Pada struktur ponton *undercarriage*, integritas sambungan las menjadi penting karena komponen bekerja sebagai bagian dari struktur yang menerima beban dan mengalami kondisi lingkungan kerja yang berubah. Kekerasan *Heat Affected Zone* dapat digunakan sebagai indikator awal untuk mengevaluasi perubahan sifat lokal akibat variasi parameter pengelasan. Pengujian Vickers sesuai untuk area pengujian yang relatif kecil dan dalam penelitian ini mengacu pada *ASTM E384-22* sebagai standar kekerasan mikroindentasi (*ASTM International*, 2022). Penggunaan metode uji Vickers untuk mengevaluasi *Heat Affected Zone* juga telah diterapkan oleh Lubis dkk. (2024), yang melakukan pengukuran kekerasan pada beberapa zona sambungan las.

Peta perkembangan riset terkini menunjukkan bahwa pengaruh arus pengelasan atau *heat input* terhadap kekerasan dan struktur mikro telah dieksplorasi secara luas, meski dengan variasi material dan kondisi aplikasi yang berbeda. Kajian pada material seperti *AISI 1045, ASTM A53, A36*, baja *offshore*, *S960MC*, dan *S690QL* memberikan landasan kuat bahwa respons *Heat Affected Zone* sangat sensitif terhadap fluktuasi termal (Muliastri dkk., 2024; Nuryanta dkk., 2024; Suharno dkk., 2023; Mičian dkk., 2021; Pinto García dkk., 2025). Khazanah keilmuan ini dipertegas oleh Paundra dkk. (2024) melalui investigasi variasi arus terhadap karakteristik *Heat Affected Zone* baja karbon rendah, sementara Lubis dkk. (2024) mendemonstrasikan efektivitas pengujian Vickers dalam memetakan gradien kekerasan pada *base* metal, *Heat Affected Zone* , dan *weld zone*. Di sisi lain, investigasi pada *ASTM A572* Grade 50 sejauh ini baru berfokus pada optimasi multivariabel untuk melihat dampak arus terhadap kekerasan, di mana kondisi optimumnya dicapai melalui kombinasi parameter makro. Dengan demikian, belum ada studi yang secara spesifik mengevaluasi interaksi rentang arus 90–130 A menggunakan elektroda *E7018* pada posisi pengelasan 1G untuk aplikasi komponen ponton *undercarriage*.

Celah penelitian terletak pada masih terbatasnya data eksperimental yang secara spesifik menghubungkan variasi arus *SMAW* 90, 110, dan 130 A, *heat input* yang dihasilkan, dan kekerasan *Heat Affected Zone* *ASTM A572* Grade 50 dalam konteks struktur ponton *undercarriage*. Penelitian Paundra dkk. (2024) menggunakan variasi arus 70–100 A tetapi menerapkan proses TIG pada baja karbon rendah, sedangkan Lubis dkk. (2024) menggunakan *GTAW* pada paduan aluminium dan memvariasikan logam pengisi. Dengan demikian, kedua penelitian SINERGI tersebut memberikan dasar ilmiah mengenai pengaruh parameter pengelasan dan metode pengujian kekerasan *Heat Affected Zone*, tetapi belum menjawab hubungan spesifik antara arus SMAW, *heat input*, dan kekerasan *Heat Affected Zone* *ASTM A572* Grade 50 pada aplikasi ponton *undercarriage*.

Kebaruan ilmiah penelitian ini adalah penyediaan korelasi kuantitatif pada rentang parameter tersebut di bawah kondisi proses yang terkendali (elektroda *E7018*, posisi 1G, dan tegangan 23 V). Kontribusi kuantitatifnya ditunjukkan oleh perubahan nilai kekerasan *Heat Affected Zone* dari 156,80 HV menjadi 143,03 HV (turun 8,78%) saat arus dinaikkan dari 90 A menjadi 130 A, yang terjadi bersamaan dengan peningkatan *heat input* dari 59,60 kJ/mm menjadi 64,10 kJ/mm.

Berdasarkan latar belakang, *state of the art*, dan celah penelitian tersebut, tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh variasi arus *SMAW* terhadap kekerasan *Heat Affected Zone* pada baja *ASTM A572* Grade 50, mengevaluasi keterkaitan antara perubahan arus dan *heat input*, serta membandingkan kecenderungan hasil penelitian ini dengan studi terdahulu. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan teknis dalam mengendalikan parameter arus *SMAW* untuk mempertahankan karakteristik mekanis *Heat Affected Zone* pada fabrikasi *ponton undercarriage*.

2. METODE

Pendekatan eksperimental diterapkan dalam studi ini guna menginvestigasi dampak dari modifikasi parameter arus pada teknik *Shielded Metal Arc Welding* (*SMAW*) terhadap profil kekerasan di area *Heat-Affected Zone*. Baja paduan rendah berkekuatan tinggi (*HSLA*) jenis *ASTM A572* Grade 50 dipilih sebagai material uji utama dalam observasi ini (diilustrasikan pada Gambar 2). Proses penyambungan pelat dieksekusi melalui prosedur *SMAW* pada posisi datar (1G) dengan memanfaatkan kawat las atau elektroda kelas *E7018*. Pengaturan operasional mesin las dirancang dengan mendiferensiasikan besaran kuat arus pada 90 A, 110 A, dan 130 A, di mana tegangan listrik dikondisikan konstan pada level 23 V. Rincian terkait sifat mekanis bawaan dari baja *ASTM A572* Grade 50 yang menjadi objek penelitian ini telah diuraikan secara lengkap pada Tabel 1

Tabel 1: Sifat Mekanis Material ASTM A572 *Grade* 50

Material	*Yield Point* (MPa)	*Tensile Strength* (MPa)	*Elongation min.* 200 mm (%)	*Elongation min.* 500 mm (%)
ASTM A572 *Grade* 50	345	450	18	21

Sumber: ASTM *Internasional* (2022)

Berdasarkan Tabel 1, material ASTM A572 Grade 50 memiliki yield point sebesar 345 MPa dan tensile strength sebesar 450 MPa. Selain itu, material memiliki elongasi minimum sebesar 18% pada panjang ukur 200 mm dan 21% pada panjang ukur 500 mm. Data tersebut digunakan sebagai karakteristik awal material sebelum mengalami proses pengelasan.

Tabel 2: Objek dan Ruang Lingkup Penelitian

Parameter	Keterangan
Material	ASTM A572 *Grade* 50
Metode Pengelasan	SMAW
Elektroda	E7018
Metode Pengujian	Uji kekerasan Vickers, ASTM E384
Ukuran Pelat	150 mm × 100 mm × 10 mm
Daerah Pengujian	1. Pelat sebelum dilakukan pengelasan 2. Daerah HAZ setelah dilakukan pengelasan
Jenis Kampuh	V tunggal, kemiringan 60°

Sumber: data eksperimen 2026

Objek dan ruang lingkup penelitian yang meliputi material, metode pengelasan, elektroda, metode pengujian, ukuran pelat, daerah pengujian, dan jenis kampuh disajikan pada Tabel 2.

Berdasarkan Gambar 1, spesimen menggunakan pelat ASTM A572 Grade 50 dengan ukuran 150 mm × 100 mm × 10 mm. Proses pengelasan menggunakan SMAW dengan elektroda E7018 pada kampuh V tunggal dengan kemiringan 60°. Daerah pengujian meliputi kondisi pelat sebelum pengelasan dan daerah *Heat Affected Zone* setelah pengelasan. Kondisi spesimen pelat *ASTM A572* Grade 50 sebelum dan sesudah proses pengelasan ditunjukkan pada Gambar 1.



(a) (b)

Gambar 1: Kondisi spesimen ASTM A572 Grade 50: (a) sebelum pengelasan dan (b) setelah pengelasan SMAW

Pengujian kekerasan Vickers dilakukan untuk mengevaluasi perubahan karakteristik mekanis secara lokal pada daerah *Heat Affected Zone* akibat variasi arus pengelasan. Proses pengujian kekerasan Vickers pada spesimen penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2: Pengujian kekerasan *Vickers* pada spesimen hasil pengelasan

Pengujian kekerasan diawali dengan preparasi permukaan spesimen yang meliputi perataan, grinding, polishing, dan pembersihan permukaan. Pengujian menggunakan indenter intan, beban sebesar 0,5 kgf, dan waktu penahanan (*dwell time*) selama 10 s sesuai dengan parameter pengujian yang digunakan dalam penelitian. Prosedur pengukuran kekerasan *micro indentation* mengacu pada *ASTM E384-22* (*ASTM International*, 2022). Pengukuran dilakukan pada tiga titik yang representatif di daerah *Heat Affected Zone* untuk setiap spesimen.

Data waktu pengelasan dicatat untuk menentukan kecepatan pengelasan dan menghitung masukan panas (*heat input*). Nilai *heat input* selanjutnya dibandingkan dengan nilai rata-rata kekerasan *Heat Affected Zone* pada setiap variasi arus. Analisis data dilakukan secara deskriptif-komparatif untuk mengevaluasi kecenderungan perubahan kekerasan *Heat Affected Zone* terhadap peningkatan arus dan *heat input*. Besaran *heat input* yang masuk ke dalam material selama proses pengelasan *SMAW* dihitung menggunakan persamaan 1 (Baghel P.K., 2022) sebagai berikut:

$$Heat\ input\ , \text{kJ/mm} = \frac{V \times I}{S \times 1000} \times \eta \qquad (1)$$

Dengan V merupakan tegangan pengelasan (V), I adalah arus pengelasan (A), dan S adalah aktual *travel speed* (mm/s). Konstanta 1000 digunakan sebagai faktor konversi waktu dan konversi energi, sedangkan η merupakan efisiensi termal dari proses SMAW yang diasumsikan sebesar 80%.

Pengujian kekerasan Vickers dilakukan untuk mengevaluasi perubahan karakteristik mekanis secara lokal pada daerah *Heat Affected Zone* akibat variasi arus pengelasan. Pengukuran nilai kekerasan Vickers didasarkan pada besaran beban dan luas area jejak indentasi pada spesimen sesuai dengan ASTM E384-22 (ASTM International, 2022), yang dirumuskan secara matematis pada Persamaan (2) sebagai berikut:

$$Kekerasan\ Vickers, HV = \frac{1.854 \times P}{d^2} \qquad (2)$$

Dengan HV menunjukkan nilai kekerasan Vickers, P adalah pembebanan yang ditetapkan selama pengujian (Kgf), dan d merupakan rata-rata diagonal indentasi yang dihasilkan pada permukaan material (mm). Nilai *heat input* dan kekerasan ini selanjutnya dianalisis secara deskriptif-komparatif untuk mengevaluasi kecenderungan perubahan kekerasan *Heat Affected Zone* terhadap peningkatan arus.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil pengukuran kekerasan dan perhitungan masukan panas

Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi arus pengelasan SMAW memengaruhi nilai *heat input* dan kekerasan rata-rata pada daerah *Heat-Affected Zone*. Peningkatan arus dari 90 A menjadi 110 A dan 130 A menghasilkan peningkatan heat input, sedangkan nilai kekerasan rata-rata *Heat Affected Zone* menunjukkan kecenderungan menurun. Nilai *heat input*, kekerasan rata-rata *Heat Affected Zone*, dan perubahan kekerasan terhadap kondisi awal pada arus 90 A disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3: Parameter Pengelasan, Angka Masukan Panas Yang Dilaporkan, dan Rerata Kekerasan HAZ

Arus (A)	*Kecepatan pengelasan* (mm/s)	*Heat Input* (kJ/mm)	Kekerasan Rata-rata HAZ (HV)	Perubahan Kekerasan vs 90 A (%)	Kenaikan *Heat Input* vs 90 A (%)	Laju Penurunan Kekerasan (HV/A)
90	2,10	59,60	156,80	0,00	0,00	—
110	2,15	63,15	151,50	-3,38	5,96	0,265 HV/A (interval 90–110 A)
130	2,20	64,10	143,03	-8,78	7,55	0,424 HV/A (interval 110–130 A)

Sumber: data eksperimen 2026

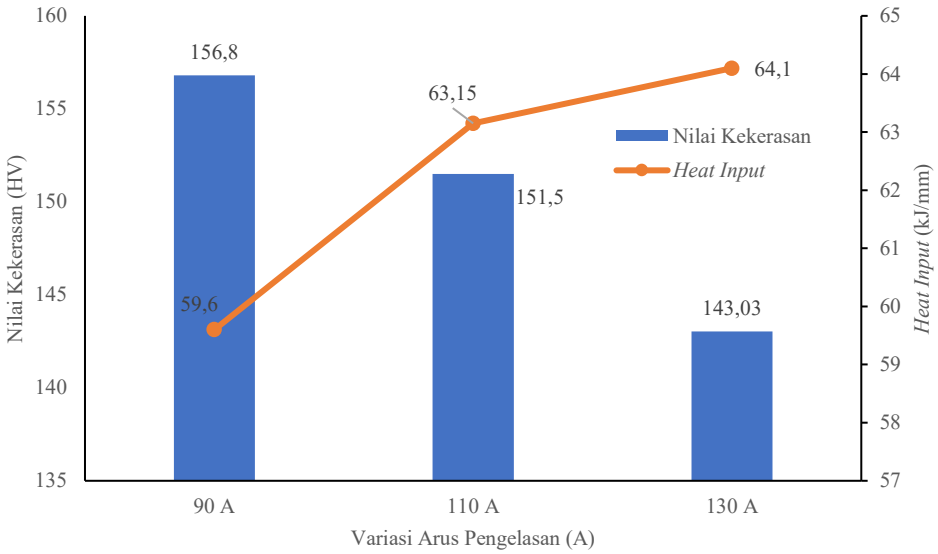
Berdasarkan Tabel 3, pada arus 90 A diperoleh *heat input* sebesar 59,60 kJ/mm dengan kekerasan rata-rata *Heat Affected Zone* sebesar 156,80 HV. Ketika arus meningkat menjadi 110 A, *heat input* meningkat menjadi 63,15 kJ/mm, sedangkan kekerasan rata-rata *Heat Affected Zone* menurun menjadi 151,50 HV. Selanjutnya, pada arus 130 A, *heat input* mencapai 64,10 kJ/mm dan kekerasan rata-rata

Heat Affected Zone menurun menjadi 143,03 HV. Dengan demikian, peningkatan arus dari 90 A menjadi 130 A menghasilkan peningkatan *heat input* sebesar 7,55% dan penurunan kekerasan sebesar 8,78%.Untuk memperjelas besarnya perubahan pada setiap variasi arus, dilakukan analisis kuantitatif terhadap perubahan arus, *heat input*, dan kekerasan *Heat Affected Zone.* 0,265 HV/A merupakan laju penurunan kekerasan pada interval 90–110 A, sedangkan 0,424 HV/A merupakan laju penurunan pada interval 110–130 A.

Peningkatan arus dari 90 A menjadi 110 A menghasilkan peningkatan *heat input* sebesar 5,96% dan penurunan kekerasan sebesar 3,38%. Sementara itu, peningkatan arus dari 110 A menjadi 130 A menghasilkan peningkatan *heat input* yang lebih kecil dibandingkan interval sebelumnya, tetapi penurunan kekerasan *Heat Affected Zone* relatif lebih besar. Kekerasan menurun sebesar 5,30 HV pada interval 90–110 A, sedangkan pada interval 110–130 A penurunannya mencapai 8,47 HV.

Jika dinyatakan sebagai laju perubahan terhadap kenaikan arus, penurunan kekerasan pada interval 90–110 A sebesar sekitar 0,265 HV/A, sedangkan pada interval 110–130 A sebesar sekitar 0,424 HV/A. Hasil tersebut menunjukkan bahwa respons penurunan kekerasan *Heat Affected Zone* terhadap peningkatan arus menjadi lebih besar pada interval 110–130 A.

Hubungan antara variasi arus pengelasan, *heat input*, dan kekerasan rata-rata *Heat Affected Zone* ditunjukkan pada Gambar 3. Gambar tersebut digunakan untuk memperjelas kecenderungan perubahan *heat input* dan kekerasan *Heat Affected Zone* akibat peningkatan arus pengelasan.



Gambar 3: Perbandingan variasi arus SMAW, rerata kekerasan HAZ, dan masukan panas

Berdasarkan Gambar 3, peningkatan arus pengelasan dari 90 A hingga 130 A menunjukkan kecenderungan peningkatan *heat input*, sedangkan kekerasan *Heat Affected Zone* mengalami penurunan. Pola tersebut konsisten dengan hasil yang ditunjukkan pada Tabel 3. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan masukan panas selama proses pengelasan berhubungan dengan perubahan sifat mekanis pada daerah *Heat Affected Zone*.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa hubungan antara arus pengelasan, *heat input*, dan kekerasan *Heat Affected Zone* tidak sepenuhnya bersifat linier. Terlihat bahwa reduksi nilai kekerasan justru berlangsung lebih drastis pada rentang arus 110-130 A, walaupun lonjakan masukan panas (*heat input*) di fase tersebut tidak seberapa besar jika dikomparasikan dengan rentang 90-110 A. Hal ini mengindikasikan bahwa respons kekerasan *Heat Affected Zone* tidak hanya ditentukan oleh besarnya *heat input*, tetapi juga dapat dipengaruhi oleh kondisi siklus termal selama proses pengelasan. Namun, karena penelitian ini belum melakukan karakterisasi struktur mikro dan analisis statistik inferensial, mekanisme tersebut masih merupakan interpretasi yang perlu dikonfirmasi melalui penelitian lanjutan

3.2 Pengaruh variasi arus terhadap kekerasan HAZ

Pada arus 90 A diperoleh kekerasan rata-rata *HAZ* sebesar 156,80 HV. Nilai tersebut menurun menjadi 151,50 HV pada 110 A dan 143,03 HV pada 130 A. Dengan demikian, peningkatan arus dari 90 A menjadi 130 A menghasilkan penurunan kekerasan rata-rata sebesar 13,77 HV atau 8,78%. Kecenderungan tersebut menunjukkan bahwa pada rentang parameter yang diuji, peningkatan arus *SMAW* diikuti oleh penurunan kekerasan *Heat Affected Zone ASTM A572* Grade 50.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan arus memberikan respons yang terukur terhadap sifat mekanis lokal *Heat Affected Zone*. Pada penelitian ini, kenaikan arus sebesar 40 A dari 90 A menjadi 130 A menghasilkan penurunan kekerasan sebesar 8,78%. Dengan demikian, peningkatan arus tidak hanya mengubah kondisi operasi pengelasan, tetapi juga berkaitan dengan perubahan karakteristik mekanis daerah yang menerima pengaruh panas.

Temuan ini dapat dibandingkan dengan penelitian Paundra dkk. (2024) yang mengkaji pengaruh dampak fluktuasi kuat arus las TIG terhadap karakteristik metalografi, kekuatan tarik, serta profil kekerasan Vickers pada material baja SS400. Penelitian tersebut menggunakan variasi arus 70, 80, 90, dan 100 A dan menunjukkan bahwa kondisi arus berpengaruh terhadap karakteristik hasil pengelasan, termasuk nilai kekerasan. Pada kondisi tertentu, kekerasan tertinggi dilaporkan mencapai 176,712 HVN pada arus 100 A dengan penggunaan magnet eksternal.

Meskipun sama-sama menunjukkan bahwa variasi arus berkaitan dengan perubahan kekerasan, arah dan besarnya perubahan pada kedua penelitian tidak dapat dibandingkan secara langsung**.** Paundra dkk. Menggunakan proses *TIG*, material SS400, serta perlakuan medan magnet eksternal, sedangkan penelitian ini menggunakan *SMAW* dengan elektroda E7018 pada *ASTM A572 Grade 50*. Perbedaan proses, material, elektroda, dan kondisi termal tersebut dapat menyebabkan respons *Heat Affected Zone* yang berbeda. Dengan demikian,

hasil Paundra dkk. Hal ini memperkuat bahwa arus merupakan parameter penting, sedangkan penelitian ini memberikan data yang lebih spesifik untuk kondisi *SMAW* pada *ASTM A572 Grade 50*.

Penelitian SINERGI oleh Lubis dkk. (2024) juga memperlihatkan pentingnya evaluasi kekerasan pada zona yang berbeda dari sambungan las. Penelitian tersebut melakukan pengujian mikro-Vickers pada *base metal*, *Heat Affected Zone*, dan *weld zone* menggunakan indentor piramida berlian dengan sudut 136°. Pendekatan tersebut mendukung penggunaan kekerasan Vickers sebagai indikator perubahan sifat mekanis lokal akibat proses pengelasan. Perbedaannya, Lubis dkk. Menggunakan proses GTAW pada paduan aluminium dan memvariasikan logam pengisi, sedangkan penelitian ini memusatkan perhatian pada pengaruh arus *SMAW* terhadap kekerasan *Heat Affected Zone ASTM A572 Grade 50.*

Jika dianalisis berdasarkan interval arus, penurunan kekerasan tidak berlangsung dengan laju yang sama. Pada peningkatan arus 90–110 A, kekerasan turun dari 156,80 HV menjadi 151,50 HV atau sebesar 5,30 HV, sehingga laju penurunannya sekitar 0,265 HV/A. Pada interval 110–130 A, kekerasan kembali turun sebesar 8,47 HV dengan laju sekitar 0,424 HV/A. Dengan demikian, laju penurunan kekerasan pada interval 110–130 A lebih besar dibandingkan dengan interval 90–110 A. Hal ini menunjukkan bahwa respons kekerasan HAZ pada rentang penelitian tidak sepenuhnya linier terhadap peningkatan arus.

3.3 Keterkaitan parameter pengelasan dan kekerasan HAZ

Pada arus 90 A, *heat input* yang diperoleh sebesar 59,60 kJ/mm, kemudian meningkat menjadi 63,15 kJ/mm pada 110 A dan 64,10 kJ/mm pada 130 A. Dengan demikian, peningkatan arus dari 90 A menjadi 130 A menghasilkan kenaikan *heat input* sebesar 4,50 kJ/mm atau 7,55%. Pada rentang yang sama, kekerasan *Heat Affected Zone* turun dari 156,80 HV menjadi 143,03 HV atau sebesar 8,78%.

Data tersebut menunjukkan kecenderungan hubungan berlawanan antara *heat input* dan kekerasan *Heat Affected Zone*. Ketika *heat input* meningkat, kekerasan rata-rata *Heat Affected Zone* cenderung menurun. Namun, hubungan tersebut belum dapat dinyatakan sebagai hubungan linier karena penelitian hanya menggunakan tiga variasi arus.

Hasil tersebut secara umum konsisten dengan penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa kondisi panas selama pengelasan berpengaruh terhadap karakteristik daerah hasil pengelasan. Penelitian Paundra dkk. (2024) memperlihatkan bahwa variasi arus pada proses TIG menghasilkan perubahan karakteristik struktur mikro dan kekerasan hasil pengelasan. Pada penelitian tersebut, *Heat Affected Zone* menunjukkan keberadaan struktur ferit, perlit, dan martensit, yang menunjukkan bahwa kondisi termal selama pengelasan berkaitan dengan perubahan struktur material.

Perbandingan tersebut memberikan dasar untuk menginterpretasikan hasil penelitian ini, tetapi tidak boleh digunakan untuk menyatakan bahwa struktur mikro penelitian ini telah terbukti mengalami perubahan tertentu**,** karena penelitian ini tidak melakukan pengamatan metalografi. Oleh sebab itu, hubungan antara peningkatan *heat input* dan penurunan kekerasan dalam penelitian ini dibatasi pada hasil pengukuran kekerasan dan interpretasi berdasarkan penelitian terdahulu.

Menariknya, kenaikan *heat input* pada dua interval tidak menghasilkan respons kekerasan yang sama. Pada interval 90–110 A, *heat input* meningkat 5,96%, sedangkan kekerasan turun 3,38%. Pada interval 110–130 A, *heat input* hanya meningkat 1,50%, tetapi penurunan kekerasan lebih besar, yaitu 5,59%. Kondisi ini menunjukkan bahwa perubahan kekerasan tidak hanya dapat dijelaskan berdasarkan persentase kenaikan *heat input*.

Dengan demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa arus dan *heat input* merupakan parameter yang berkaitan dengan perubahan kekerasan *Heat Affected Zone*, tetapi hubungan keduanya tidak cukup untuk menjelaskan seluruh respons material. Faktor lain seperti kecepatan pengelasan, kondisi pendinginan, komposisi material, jenis elektroda, dan karakteristik siklus termal dapat berperan. Temuan ini selaras dengan laporan studi SINERGI yang menegaskan bahwa perubahan parameter pengelasan memicu variasi respons kekerasan yang bersifat spesifik terhadap jenis material serta konfigurasi proses yang diterapkan.

3.4 Perbandingan dengan penelitian terdahulu

Hasil penelitian ini secara umum memperkuat penelitian terdahulu bahwa parameter pengelasan berpengaruh terhadap karakteristik mekanis daerah hasil pengelasan. Paundra dkk. (2024) menunjukkan bahwa variasi arus pada TIG berhubungan dengan perubahan kekerasan, struktur mikro, dan kekuatan tarik SS400. Lubis dkk. (2024) menunjukkan bahwa pengujian mikro-Vickers dapat digunakan untuk membedakan karakteristik kekerasan pada base metal*, Heat Affected Zone, dan* weld zone.

Persamaan utama penelitian ini dengan penelitian Paundra dkk. Adalah sama-sama menunjukkan bahwa variasi arus berkaitan dengan perubahan kekerasan daerah hasil pengelasan. Perbedaannya terletak pada proses dan material. Paundra dkk. Menggunakan *TIG* pada SS400 dengan tambahan magnet eksternal, sedangkan penelitian ini menggunakan *SMAW* pada *ASTM A572* Grade 50. Karena itu, hasil penelitian ini memberikan informasi yang lebih spesifik terhadap perilaku *Heat Affected Zone* pada baja *HSLA* yang digunakan sebagai material struktur.

Sementara itu, penelitian Lubis dkk. Memiliki kesamaan pada pendekatan pengujian kekerasan, yaitu menggunakan metode Vickers pada daerah yang terpengaruh oleh proses pengelasan. Namun, penelitian tersebut menggunakan *GTAW* pada paduan aluminium dan memvariasikan *filler*. Penelitian ini menggunakan *SMAW* dan memvariasikan arus, sehingga memberikan perspektif berbeda mengenai pengaruh parameter proses terhadap kekerasan *Heat Affected Zone*.

Apabila dikaitkan dengan penelitian terdahulu pada *ASTM A572* Grade 50, hasil penelitian ini semakin memperkuat bahwa *welding current* merupakan parameter yang perlu dikendalikan. Kontribusi penelitian ini terletak pada kuantifikasi perubahan kekerasan *Heat Affected Zone* sebesar 8,78% pada peningkatan arus 90–130 A serta pengaitan perubahan tersebut dengan kenaikan *heat input* sebesar 7,55%**.**

Dengan demikian, posisi penelitian ini bukan sekadar mengulang penelitian terdahulu, tetapi mengisi celah pada kombinasi material–proses–parameter–aplikasi, yaitu ASTM A572 Grade 50 + SMAW E7018 + arus 90–130 A + *heat input* + kekerasan *Heat Affected Zone* untuk struktur ponton *undercarriage*.

3.5 Implikasi terhadap komponen ponton undercarriage

Untuk komponen ponton *undercarriage*, pengaturan arus penting bagi kualitas sambungan. Pada kondisi penelitian ini, arus 90 A menghasilkan kekerasan HAZ tertinggi dan 130 A menghasilkan nilai terendah. Namun, kekerasan yang lebih tinggi tidak secara otomatis menunjukkan kualitas sambungan yang lebih baik. Selisih kekerasan sebesar 13,77 HV antara arus 90 A dan 130 A memberikan indikasi bahwa pemilihan arus perlu dievaluasi bersama parameter lain. Tanpa pengujian penetrasi, cacat las, kekuatan tarik, ketangguhan, dan distorsi, tidak tersedia dasar untuk merekomendasikan arus terbaik bagi aplikasi struktural.

Penentuan prosedur pengelasan yang sesuai untuk ponton *undercarriage* membutuhkan evaluasi sifat mekanis yang lebih luas dan pemeriksaan mutu sambungan. Karena itu, hasil penelitian ini sebaiknya dipakai sebagai informasi awal, bukan sebagai bukti terpenuhinya persyaratan desain atau keselamatan komponen. Penurunan kekerasan HAZ seiring dengan peningkatan *heat input* dapat dikaitkan dengan perubahan kondisi termal yang dialami material selama proses pengelasan. Peningkatan masukan panas menyebabkan daerah HAZ mengalami siklus termal yang berbeda, yang berpotensi memengaruhi transformasi struktur mikro dan sifat mekanis lokal. Interpretasi ini selaras dengan studi terdahulu yang menempatkan masukan panas (*heat input*) sebagai parameter krusial dalam memengaruhi karakteristik HAZ pada baja pasca-pengelasan. Kendati demikian, absennya karakterisasi struktur mikro secara langsung dalam penelitian ini membuat perubahan metalografi tersebut tidak diposisikan sebagai hasil temuan empiris.

3.6 Keterbatasan penelitian

Pelaksanaan eksperimen ini dihadapkan pada sejumlah ruang lingkup yang membatasi. Aspek pertama, pengujian parameter arus dibatasi pada tiga variasi saja, yakni 90 A, 110 A, serta 130 A. Oleh sebab itu, korelasi yang dihasilkan antara pengaturan arus dan tingkat kekerasan belum sepenuhnya merepresentasikan spektrum kapasitas operasional dari metode *SMAW* secara komprehensif. Aspek kedua, cakupan evaluasi pada studi ini hanya terpusat pada kalkulasi besaran *heat input* dan pengujian profil kekerasan di area *Heat Affected Zone*. Implikasinya, penelitian ini belum mampu memaparkan secara definitif terkait fenomena transformasi struktur mikro yang secara mekanis menjadi pemicu fluktuasi nilai kekerasan tersebut.

Keterbatasan tersebut berbeda dengan penelitian Paundra dkk. (2024), yang selain melakukan pengujian kekerasan juga melakukan pengamatan struktur mikro dan pengujian tarik. Penelitian Lubis dkk. (2024) juga mengombinasikan pengujian kekerasan Vickers dengan pengamatan struktur mikro. Dengan demikian, penelitian lanjutan pada *ASTM A572* Grade 50 sebaiknya menggabungkan pengujian kekerasan dengan metalografi, *SEM/EDS*, pengujian tarik, atau pengujian ketangguhan.

Selain itu, penelitian ini belum menggunakan analisis statistik inferensial. Oleh karena itu, perbedaan nilai kekerasan antar variasi arus belum dapat dinyatakan sebagai perbedaan yang signifikan secara statistik. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan jumlah spesimen dan pengulangan yang lebih banyak serta analisis *ANOVA* untuk menguji signifikansi pengaruh arus terhadap kekerasan *Heat Affected Zone*.

4. KESIMPULAN

Variasi arus pengelasan busur listrik elektroda terbungkus menggunakan elektroda E7018 menunjukkan kecenderungan penurunan kekerasan daerah terpengaruh panas pada baja ASTM A572 *Grade* 50 seiring dengan meningkatnya arus pengelasan. Pada rentang arus yang diuji, kekerasan rata-rata mengalami penurunan sebesar 8,78%. Temuan ini memberikan gambaran awal mengenai hubungan antara parameter pengelasan dan karakteristik kekerasan material. Namun, hasil penelitian masih bersifat deskriptif dan belum dapat digunakan untuk menentukan arus pengelasan optimum karena keterbatasan pengulangan spesimen serta belum dilakukannya pengujian signifikansi statistik. Selain itu, perhitungan masukan panas masih memerlukan verifikasi untuk memperkuat interpretasi hasil. Penelitian selanjutnya perlu mencakup pengujian dengan jumlah spesimen yang lebih representatif, karakterisasi struktur mikro, serta pengujian sifat mekanis sambungan untuk mendukung penentuan parameter pengelasan yang sesuai bagi aplikasi struktural.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT Budhi Wiguna Prima atas dukungan fasilitas selama pelaksanaan penelitian.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang dapat memengaruhi pelaksanaan atau pelaporan penelitian ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Frasye Joni Pasau : Peran Metodologi, Validasi, Supervisi, Penyuntingan Naskah.
Eko Nugroho : Konseptualisasi, Investigasi, Analisis Data, Penulisan Draf.
Manaseh : Supervisi, Validasi.
Budha Maryanti : Supervisi, Validasi.
Siska Ayu Kartika : Supervisi, Validasi.

Seluruh penulis telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pelaksanaan penelitian, penyusunan naskah, serta telah membaca, meninjau, dan menyetujui versi akhir naskah untuk dipublikasikan. Seluruh penulis juga bertanggung jawab atas integritas, keakuratan, dan keabsahan isi artikel ini.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN BUATAN

Dalam penyusunan manuskrip, penulis menggunakan teknologi kecerdasan buatan atau berbantuan kecerdasan buatan untuk membantu penyuntingan bahasa dan keterbacaan serta penelusuran awal referensi. Seluruh keluaran telah ditinjau dan disunting oleh penulis.

DAFTAR PUSTAKA

ASTM International. (2022). ASTM E384-22: Standard test method for microindentation hardness of materials. ASTM Internasional, dari https://share.google/5t5m7twNAVaqQx2Qs.

Baghel, P. K. (2022). Effect of SMAW process parameters on similar and dissimilar metal welds: An overview. Heliyon, 8(12), 1-14.

Díaz Ávila, Á. M., Herrera De Oro, E. J., Medellín Pérez, E. C., Niebles Núñez, E. E., & Unfried-Silgado, J. (2023). Evaluation of the effect of heat input on welded joint properties of ASTM A572 Grade 50 steel using the GMAW process with 90Ar-10CO_2 shielding gas and spray metal transfer. Soldagem & Inspeção, 28, 1-13.

Huda, Z., & Alostath, M. M. (2022). Effects of process parameters on SMAW weld quality using SK-260-M E6013 electrodes. Journal of Technological Science & Engineering, 2(1), 17-20.

Lubis, R. W., Dharma, S., Rahmawaty, R., Sebayang, R., Bahri, N., & Aditya, M. A. (2024). Analisis pengaruh variasi logam pengisi (*filler*) pada proses pengelasan GTAW paduan aluminium terhadap uji kekerasan dan struktur mikro. *SINERGI Polmed: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, 5*(2), 42-51.

Mičian, M., Frátrik, M., & Kajánek, D. (2021). Influence of welding parameters and filler material on the mechanical properties of HSLA steel S960MC welded joints. *Metals, 11*(2), 1-18.

Muliastri, D., Iryani, L., Setiawan, D., Ramadhan, K., & Okviyanto, T. (2024). Pengaruh variasi kuat arus SMAW terhadap sifat mekanik baja AISI 1045. Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur, 9(2), 162-170.

Nuryanta, M. I., Basyirun, B., Habib, M. H., Fitriyana, D. F., Siregar, J. P., Cionita, T., Guterres, N. F. D. S., & Da Silva, M. D. S. (2024). Hardness and microstructure characterisation of hardfacing alloys deposited by shielded metal arc welding (SMAW) on AISI 1045 medium carbon steel. International Journal of Integrated Engineering, 16(5), 88-99.

Paundra, F., Yudanta, F. R., Muhyi, A., Pujiyulianto, E., Syanur, F. N., & Darsono, F. B. (2024). Pengaruh penggunaan magnet eksternal dan variasi arus pada pengelasan TIG terhadap struktur mikro, kekerasan dan kekuatan tarik baja karbon rendah. SINERGI Polmed: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, 5(2), 19-26.

Paundra, F., Yasmin, D. S., Pujiyulianto, E., Muhyi, A., Rajagukguk, K., & Prabowo, I. (2025). Effect of welding current on low-carbon steel characteristics in the SMAW cladding process. Jurnal Pendidikan Teknik Mesin, 25(1), 1-7.

Pinto García, R., Peral Martínez, L. B., & Belzunce Varela, F. J. (2025). Influence of heat input and post-weld heat treatment on the properties of the heat affected zone and weld metal of welded joints on S690QL steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 139, 4011-4028.

Prabowo, S., & Sugondo, S. (2023). Pengaruh variasi posisi pengelasan dan diameter elektroda terhadap kekuatan tarik dan struktur makro hasil pengelasan SMAW pada logam tak sejenis. Jurnal Teknik Mesin, 21(1), 15-22.

Stornelli, G., Tselikova, A., Schmidt, R., Rodriguez Vargas, B. R., Zucca, G., & Di Schino, A. (2023). The effect of vanadium micro-alloying on the microstructure of welded joints in high-strength structural steels. MRS Advances, 8, 1200-1205.

Suharno, S., Fikri, M. R., Pambudi, N. A., Harjanto, B., Jumintono, & Rizkiana, R. (2023). The effect of variation in electric current on physical and mechanical properties in A36 steel welding. *Welding International, 37*(10), 553-562.

Utami, N. P. E., Pratiwi, D. K., Chandra, H., Astuti, E., Prastyanto, W. H., Riady, M. I., Santoso, D., & Saputra, M. A. A. (2025). Microstructural evolution and mechanical performance of SMAW dissimilar welds between ASTM A36 and AISI 316 with E316-16 electrode at different welding currents. Indonesian Journal of Engineering and Science, 6(3). 157-165.