

Pengaruh Variasi Tegangan Busur dan Arus Las terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Sambungan Baja SS400 pada Pengelasan GMAW-CO₂

Muhammad Amwalluddin¹, Lazuardi Akmal Islami²

^{1,2} Mechanical Engineering, Faculty of Computer, Design, and Engineering, Nusa Putra University

Jl. Raya Cibolang No.21, Cisaat, Kabupaten Sukabumi, Jawa Barat, Indonesia

*Corresponding author: muhammad.amwalluddin_tm21@nusaputra.ac.id

Abstract

The quality of Gas Metal Arc Welding (GMAW) joints with CO₂ shielding gas is strongly influenced by arc voltage and current parameters, which determine the magnitude of heat input and affect weld defects, mechanical properties, and microstructure of the joint. Previous studies have generally examined these three aspects separately, and no study has specifically integrated them into a single systematic testing framework. This study analyzes the effect of voltage and current variations (20 V/160 A, 25 V/200 A, and 30 V/250 A) on weld defects, hardness, and microstructure of SS400 steel joints welded using GMAW-CO₂, through Non-Destructive Testing (Liquid Penetrant Test), Destructive Testing (bending and micro-Vickers hardness tests), and microstructural analysis using ImageJ software. The results show that all specimens were free of surface defects. The 25 V/200 A parameter produced the highest HAZ hardness and bending strength (165 HV; 455.1 MPa) with the most homogeneous microstructure, while 30 V/250 A showed decreased performance due to grain coarsening. These findings demonstrate that the relationship between heat input and weld quality is non-monotonic, emphasizing the importance of an integrated testing approach in determining optimal welding parameters.

Keywords: SS400, GMAW, Heat Input, bending test, microstructure

Abstrak

Kualitas sambungan las GMAW dengan gas pelindung CO₂ sangat dipengaruhi oleh parameter tegangan busur dan arus, yang menentukan besarnya *heat input* serta berdampak pada cacat las, sifat mekanik, dan struktur mikro sambungan. Penelitian terdahulu umumnya membahas ketiga aspek tersebut secara terpisah, sehingga belum ada kajian yang mengintegrasikannya dalam satu rangkaian pengujian sistematis. Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi tegangan dan arus las (20 V/160 A, 25 V/200 A, 30 V/250 A) terhadap cacat las, kekerasan, dan struktur mikro sambungan baja SS400 hasil pengelasan GMAW-CO₂, melalui *Non-Destructive Test (Liquid Penetrant Test)*, *Destructive Test* (uji *bending* dan kekerasan mikro *Vickers*), serta analisis mikrostruktur menggunakan ImageJ. Hasil menunjukkan seluruh spesimen bebas cacat permukaan. Parameter 25 V/200 A menghasilkan kekerasan HAZ dan kekuatan lentur tertinggi (165 HV; 455,1 MPa) dengan struktur mikro paling homogen, sedangkan 30 V/250 A menurun akibat *grain coarsening*. Temuan ini membuktikan hubungan *heat input* dan kualitas las bersifat non-monoton, serta menegaskan pentingnya pendekatan pengujian terintegrasi dalam menentukan parameter pengelasan optimal.

Kata kunci: SS400, GMAW, *Heat Input*, uji *bending*, mikrostruktur

1. Pendahuluan

Pengelasan merupakan salah satu proses penyambungan logam yang sangat penting dalam industri manufaktur dan konstruksi modern. Hampir seluruh sektor industri logam seperti otomotif, perkapalan,

jembatan, serta alat berat menggunakan proses pengelasan untuk memperoleh sambungan yang kuat dan permanen. Di antara berbagai metode pengelasan, *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) atau *Metal Inert Gas* (MIG) dengan pelindung gas CO₂

DOI: <http://dx.doi.org/10.24127/trb.v15i2.5380>

Received 8 July 2026; Received in revised form 14 July 2026; Accepted 27 August 2026

Available online 30 August 2026



menjadi salah satu metode yang paling banyak digunakan karena efisiensi proses, kemudahan pengaturan parameter, serta kemampuannya menghasilkan sambungan berkualitas tinggi dengan biaya operasional yang relatif rendah.

Proses pengelasan CO₂ memanfaatkan busur listrik antara kawat elektroda dan logam induk yang mencair untuk membentuk sambungan logam. Gas CO₂ berfungsi melindungi logam cair dari kontaminasi udara luar seperti oksigen dan nitrogen yang berpotensi menimbulkan cacat pada hasil lasan [1]. Meskipun demikian, kualitas hasil pengelasan sangat ditentukan oleh parameter proses seperti tegangan busur, kuat arus, dan kecepatan pengelasan, yang secara langsung memengaruhi besarnya *heat input* yang diterima logam dasar.

Apabila parameter pengelasan tidak dikontrol dengan tepat, akan muncul berbagai cacat las seperti *porosity*, *undercut*, *incomplete penetration*, dan *crack*, yang dapat menurunkan kekuatan sambungan dan mengancam integritas struktur. Selain itu, variasi arus dan tegangan turut memengaruhi distribusi panas yang pada akhirnya mengubah struktur mikro dan sifat mekanik daerah las, khususnya pada wilayah *weld metal* (WM) dan *heat affected zone* (HAZ).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa faktor eksternal seperti kondisi lingkungan kerja turut berkontribusi terhadap kualitas hasil pengelasan [2]. Namun, penelitian tersebut umumnya hanya menyoroti pengaruh kecepatan angin terhadap hilangnya perlindungan gas CO₂ tanpa mengaitkannya secara kuantitatif dengan jenis cacat yang dihasilkan, sehingga hubungan sebab-akibatnya belum terukur secara eksplisit. Di sisi lain, kondisi elektroda yang lembap dilaporkan dapat meningkatkan kadar hidrogen difusibel dalam logam cair dan memicu retak [3], meskipun kajian tersebut belum mengaitkan fenomena ini dengan variasi parameter arus dan tegangan secara simultan. Oleh sebab

itu, pengendalian kondisi pengelasan dan pemeriksaan kualitas sambungan tetap menjadi tahapan krusial dalam menjamin mutu hasil las.

Untuk memastikan sambungan yang dihasilkan bebas cacat dan memenuhi standar, dilakukan serangkaian pengujian yang umumnya dibagi menjadi dua kategori, yaitu *Destructive Test* (DT) dan *Non-Destructive Test* (NDT). Pengujian destruktif dilakukan dengan merusak spesimen untuk menilai kekuatan atau keuletan sambungan, seperti uji tarik, uji *bending*, dan uji kekerasan mikro. Sementara itu, pengujian non-destruktif dilakukan tanpa merusak benda kerja, dengan tujuan mendeteksi cacat permukaan maupun cacat internal menggunakan metode seperti *penetrant test*, *ultrasonic test*, atau *radiographic test*.

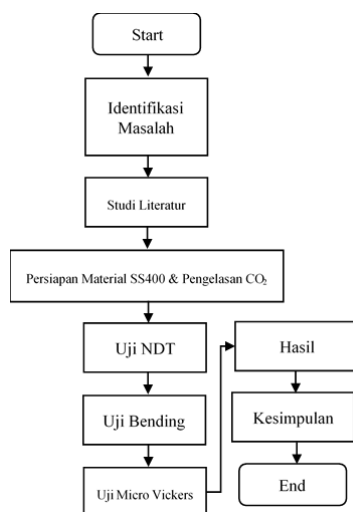
Pada pengelasan baja karbon seperti SS400 dan ASTM A36, parameter tegangan dan arus diketahui memiliki pengaruh besar terhadap nilai kekerasan dan kekuatan tarik sambungan [4]. Peningkatan arus dilaporkan memperbesar *heat input*, menyebabkan struktur mikro menjadi lebih kasar, serta menurunkan kekerasan pada daerah HAZ [4]. Namun demikian, sebagian besar penelitian tersebut membahas pengaruh arus dan struktur mikro secara terpisah dari indikasi cacat las yang muncul, sehingga hubungan antara parameter pengelasan, jenis cacat, dan perubahan sifat mekanik belum dikaji secara terintegrasi dalam satu kerangka pengujian [5].

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan metode uji mikro, DT, dan NDT secara bersamaan mampu memberikan analisis yang lebih komprehensif terhadap kualitas sambungan las [6]. Metode NDT memastikan hasil lasan bebas dari cacat permukaan, sedangkan metode DT dan uji mikro menjelaskan perubahan sifat mekanik dan struktur mikro akibat variasi *heat input* [7]. Akan tetapi, penelitian-penelitian tersebut umumnya membahas ketiga metode pengujian tersebut secara parsial atau pada material dan variasi

parameter yang berbeda-beda, sehingga belum ditemukan kajian yang secara khusus mengintegrasikan variasi tegangan-arus, deteksi cacat las, kekerasan, dan struktur mikro dalam satu rangkaian pengujian sistematis pada sambungan baja SS400 berpelindung gas CO₂. Kesenjangan inilah yang mendasari perlunya kajian lanjutan yang lebih komprehensif.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi tegangan busur dan arus las terhadap kemungkinan cacat las, kekerasan, dan struktur mikro pada sambungan baja SS400 menggunakan gas pelindung CO₂. Hal baru dari penelitian ini terletak pada pengintegrasian metode *Non-Destructive Test* (NDT) berupa *Liquid Penetrant Test* dengan *Destructive Test* (DT) berupa uji *bending* dan uji mikro (*micro-Vickers* dan metalografi) secara simultan terhadap variasi kombinasi tegangan dan arus, sehingga diperoleh peta hubungan yang lebih menyeluruh antara parameter pengelasan, jenis cacat, kekerasan, dan struktur mikro suatu pendekatan yang belum banyak diungkap secara terpadu pada penelitian-penelitian sebelumnya.

2. Metode Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir 1

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja karbon rendah tipe SS400 berbentuk pelat dengan ketebalan 10 mm.

Proses pengelasan dilakukan menggunakan metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) dengan gas pelindung CO₂ menggunakan mesin las Panasonic seri KR500. Material pengisi yang digunakan adalah *wire* AWS A5.18 ER70S-6 berdiameter 1 mm.

Penelitian ini menggunakan enam (6) spesimen uji yang masing-masing dilas dengan variasi tegangan busur dan arus las yaitu 20 V/160 A, 25 V/200 A, dan 30 V/250 A, dengan masing-masing variasi dibuat dua spesimen. Sebelum proses pengelasan, bagian permukaan pelat dibersihkan menggunakan amplas dan alkohol agar bebas dari kotoran, minyak, maupun oksida yang dapat mengganggu kualitas hasil pengelasan. Setiap spesimen juga diberi *ceramic backing* pada sisi bawah sambungan untuk menjaga bentuk akar las (*root pass*) dan mencegah terjadinya *burn through* selama proses pengelasan berlangsung.

Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi mesin las GMAW tipe *inverter*, tabung gas pelindung CO₂, alat uji *penetrant* (*liquid penetrant test kit*), mesin uji tarik merek MFL No. Seri: 8354, kapasitas 200 kN, serta mikroskop metalografi untuk analisis mikrostruktur. Parameter pengelasan seperti panjang busur, kecepatan pengelasan, dan polaritas arus diatur secara konstan untuk menjaga konsistensi hasil pada setiap variasi. Proses pengelasan dilakukan pada posisi 1G (datar) untuk meminimalkan pengaruh gravitasi terhadap kolam las. Besarnya *heat input* pada setiap variasi parameter dihitung menggunakan persamaan berikut [8]:

V = Tegangan busur (Volt)

I = Arus pengelasan (Ampere)

v = kecepatan pengelasan (mm/menit)

$$HI = \frac{60 \times V \times I}{1000 \times v} \text{ (kJ/mm)}$$

Kecepatan pengelasan dijaga konstan pada seluruh variasi sebesar 350 mm/menit,

Tabel 1. Keterangan dan hasil heat input

Variasi	V (Volt)	I (Ampe re)	v (mm/menit)	Heat Input (kJ/mm)
1	20	160	350	0,55
2	25	200	350	0,86
3	30	250	350	1,29

nilai heat input sebesar 0,55 kJ/mm, 0,86 kJ/mm, dan 1,29 kJ/mm berturut-turut untuk variasi 20 V/160 A, 25 V/200 A, dan 30 V/250 A.

Tahapan pertama dari penelitian ini adalah pengujian *Non-Destructive Test* (NDT) dengan menggunakan metode *Liquid Penetrant Test* (LPT). Uji *penetrant* dilakukan pada seluruh spesimen untuk mendeteksi adanya cacat permukaan seperti *crack*, *porosity*, maupun *incomplete fusion* sesuai dengan standar ASME Section V Article 6. Prosedur pengujian meliputi pembersihan awal (*pre-cleaning*) menggunakan pelarut, penyemprotan cairan *penetrant* merah, waktu peresapan selama 10 menit, pembersihan *penetrant* berlebih, dan penyemprotan *developer* putih untuk menampilkan indikasi cacat. Hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa semua spesimen dalam kondisi bebas cacat permukaan.

Setelah dilakukan pengujian NDT, enam spesimen dibagi menjadi dua kelompok. Tiga (3) spesimen pertama digunakan untuk pengujian destruktif (*Destructive Test/DT*) yang meliputi uji *bending* sesuai standar ASTM E190 (*Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds*), dan pengujian mikrostruktur (uji metalografi) sesuai standar ASTM E-384 dengan menggunakan mesin METKON DUROLINE M *Microhardness Tester*. Tiga spesimen lainnya tetap dipertahankan sebagai sampel hasil NDT. Proses uji *bending* dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan metode *guided bend test* (jenis *face bend* dan *root bend*) untuk mengetahui tingkat keuletan (ductility) sambungan las serta mendeteksi kemungkinan cacat internal seperti retak pada akar maupun permukaan las, pada masing-masing variasi arus dan tegangan.

Selanjutnya dilakukan analisis struktur mikro menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 500x. Permukaan potongan melintang pada sambungan las dipoles menggunakan amplas bertingkat (*grit* 400 hingga 2000), kemudian dipoles dengan *autosol* dan selanjutnya dilakukan *etching* menggunakan larutan Nital 2%. Pengamatan dilakukan pada tiga area utama yaitu *base metal* (BM), *heat affected zone* (HAZ), dan *weld metal* (WM) untuk mengetahui perubahan bentuk butiran akibat perbedaan masukan panas (*heat input*).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Pemeriksaan Non-Destructive Test (NDT)

Pengujian *Non-Destructive Test* (NDT) dilakukan dengan metode *Liquid Penetrant Test* (LPT) pada seluruh spesimen hasil pengelasan untuk mendeteksi cacat permukaan seperti retak (*crack*), porositas, *undercut*, dan *incomplete fusion*. Metode ini dipilih karena mampu mendeteksi ketidaksempurnaan pada permukaan sambungan secara akurat tanpa merusak spesimen, sehingga spesimen tetap dapat digunakan untuk pengujian mekanik dan metalurgi selanjutnya [6].



Gambar 3. Hasil Pengujian Liquid Penetrant Test (LPT)

Prosedur pengujian mengacu pada standar ASME Section V Article 6, dengan tahapan sebagai berikut:

1. pembersihan permukaan las dari minyak dan debu menggunakan pembersih khusus (*pre-cleaning*),
2. penyemprotan cairan *penetrant* berwarna merah pada area sambungan,
3. waktu penetrasi (*dwell time*) selama 10 menit agar cairan meresap ke dalam retakan mikro,

4. penghapusan *penetrant* berlebih dan penyemprotan *developer* putih untuk menarik cairan dari celah cacat; serta,
5. inspeksi visual di bawah pencahayaan standar untuk mengidentifikasi indikasi cacat.

Tabel 2. Hasil Pemeriksaan Liquid Penetrant Test

No	Variasi Tegangan/Arus	Jenis Cacat Ditemukan	Keterangan
1	20 V / 160 A	Tidak ada	Permukaan bersih dan halus
2	25 V / 200 A	Tidak ada	Permukaan bersih dan homogen
3	30 V / 250 A	Tidak ada	Permukaan bersih, tanpa indikasi cacat

Hasil pemeriksaan pada Tabel 1 menunjukkan bahwa seluruh spesimen pada ketiga variasi tegangan dan arus (20 V/160 A, 25 V/200 A, dan 30 V/250 A) tidak menunjukkan indikasi cacat permukaan, baik berupa retak, porositas, maupun diskontinuitas lainnya. Permukaan lasan pada seluruh variasi tampak bersih, homogen, dan bebas dari indikasi *bleed-out* penetrant, yang mengindikasikan bahwa parameter pengelasan yang digunakan telah menghasilkan kondisi fusi yang optimal dan gas pelindung CO₂ bekerja efektif mencegah kontaminasi atmosfer selama proses pembekuan lasan.

Hasil bebas cacat pada seluruh variasi parameter berkaitan erat dengan kestabilan proses perlindungan busur las. Aditiawan dan Tnunay [9] menyatakan bahwa salah satu penyebab utama porositas pada lasan adalah terganggunya aliran gas pelindung akibat hembusan udara luar atau tekanan gas yang tidak stabil, yang menyebabkan unsur nitrogen dan oksigen atmosfer terjebak dalam logam las saat membeku. Pada penelitian ini, proses pengelasan dilakukan di ruang tertutup dengan laju alir gas konstan sekitar 15 L/menit, sehingga cakupan pelindung gas terhadap kolam las tetap konsisten, busur listrik stabil, dan risiko kontaminasi atmosfer dapat diminimalkan.

Selain kestabilan aliran gas, penggunaan *ceramic backing* turut berperan menjaga kualitas akar las (*root pass*). Bahan keramik

ini menahan logam cair agar tidak menetes berlebih pada sisi bawah sambungan, sehingga mencegah terjadinya *burn-through* dan memastikan penetrasi akar yang seragam. Kombinasi kedua faktor tersebut kestabilan gas pelindung dan penggunaan *backing* menjelaskan mengapa pengelasan pada rentang parameter 20–30 V dan 160–250 A secara konsisten menghasilkan fusi sempurna tanpa cacat permukaan pada seluruh variasi yang diuji.

Temuan ini menegaskan bahwa proses pengelasan GMAW dengan gas pelindung CO₂ merupakan metode yang efisien dan ekonomis untuk penyambungan baja karbon rendah, dengan syarat pengaturan laju alir gas pelindung dan parameter arus-tegangan dilakukan secara tepat dan terkontrol.

3.2 Hasil Uji Bending (Destructive Test)

Pengujian *bending* dilakukan sesuai standar SNI 0410:2017 pada tiga spesimen hasil pengelasan GMAW–CO₂. Parameter geometri spesimen (tebal, lebar, dan jarak tumpuan) mengacu pada laporan hasil uji laboratorium dengan kode spesimen U395-1, U395-2, dan U395-3.



Gambar 2. Hasil Uji Bending (A) 20V

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan sambungan las menahan beban lentur hingga terjadi kegagalan, mengingat pada kondisi layan, sambungan las tidak hanya menerima beban tarik atau tekan, tetapi juga beban lentur. Hasil pengujian menunjukkan gaya maksimum sebesar 18.200 N, 19.500 N, dan 17.900 N pada ketiga variasi parameter pengelasan (20 V/160 A, 25 V/200 A, dan 30 V/250 A). Dengan asumsi konfigurasi *three-point bending* dan penampang persegi panjang, tegangan lentur maksimum dihitung menggunakan persamaan lentur klasik (*flexure formula*).

Tabel 3. Hasil Uji Bending Baja SS400 dengan Variasi Arus Pengelasan

N o	Variasi Tegangan/ Arus (V/A)	Gaya Maksimum (N)	Kekuatan Lentur (Mpa)	I (m ⁴)	EI (N·m ²)	Kekakuan K (N/m)
1	20 V / 160 A	18.200	441.7	2.49 6×10 ⁻⁹	5.241× 10 ²	1.3338 x10 ⁸
2	25 V / 200 A	19.500	455.1	2.67 6×10 ⁻⁹	5.619× 10 ²	1.3903 x10 ⁸
3	30 V / 250 A	17.900	419.6	2.64 2×10 ⁻⁹	5.548× 10 ²	1.3833 x10 ⁸

Perhitungan tegangan lentur maksimum berdasarkan Tabel 2 menghasilkan nilai 441,7 MPa (20 V/160 A), 455,1 MPa (25 V/200 A), dan 419,6 MPa (30 V/250 A), dengan modulus elastisitas yang digunakan $E = 210 \text{ GPa}$.

Nilai tertinggi tegangan lentur dan kekakuan mekanik teramati pada kondisi 25 V/200 A, yang konsisten dengan hasil uji kekerasan mikro dan pengamatan mikrostruktur yang menunjukkan butiran HAZ paling halus pada parameter tersebut. Kesesuaian antar-ketiga pengujian ini memperkuat kesimpulan bahwa kombinasi 25 V/200 A menghasilkan sifat mekanik sambungan las yang paling optimal di antara variasi yang diuji.

Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan arus memang meningkatkan penetrasi las hingga titik optimum, namun apabila *heat input* terlalu tinggi, laju pendinginan menjadi lebih lambat sehingga terjadi pertumbuhan butir kasar pada daerah HAZ. Butiran yang kasar ini menyebabkan sifat mekanik menurun karena jumlah batas butir yang berfungsi menahan pergerakan dislokasi menjadi berkurang [1].

Berdasarkan pola tersebut, parameter 25 V/200 A dinilai paling efisien karena menghasilkan fusi sempurna, penetrasi optimal, dan struktur mikro HAZ yang relatif halus. Sebaliknya, pada 160 A, arus yang digunakan relatif kecil sehingga penetrasi kurang dalam dan sambungan berpotensi tidak menyatu sempurna; sementara itu, pada 250 A, *heat input* berlebih mendorong pertumbuhan butir dan

menurunkan kekuatan lentur terlihat dari nilai 419,6 MPa yang lebih rendah dibanding 25 V/200 A meskipun arus lebih tinggi.

Hubungan ini sejalan dengan temuan bahwa parameter arus dan tegangan berbanding lurus dengan kekuatan tarik hingga titik optimum, namun berbanding terbalik setelah terjadi *overheating* pada daerah las [5]. Dengan demikian, kondisi 25 V/200 A dapat dianggap sebagai titik ideal yang menyeimbangkan penetrasi dan kestabilan struktur mikro untuk menghasilkan sambungan yang kuat dan stabil.

Secara keseluruhan, hasil uji *bending* ini memperlihatkan keterkaitan yang konsisten dengan pengujian kekerasan dan mikrostruktur pada arus rendah, penetrasi kurang optimal, sedangkan pada arus tinggi, peningkatan *heat input* memicu pertumbuhan butir di HAZ dan menurunkan kekuatan mekanik. Perubahan parameter tersebut mendorong transformasi fase dan perubahan ukuran butir yang pada akhirnya memengaruhi kekuatan mekanik material secara menyeluruh [13].

3.3 Hasil Uji Kekerasan Mikro (Vickers Hardness Test)

Uji kekerasan dilakukan pada tiga area utama sambungan, yaitu logam induk (*Base Metal/BM*), daerah pengaruh panas (*Heat Affected Zone/HAZ*), dan logam las (*Weld Metal/WM*), menggunakan *Micro Vickers Hardness Tester* dengan beban indentasi 1 kgf sesuai standar ASTM E-384.

Tabel 4. Nilai Kekerasan Mikro pada Tiap Zona Sambungan

Variasi Arus (A)	Variasi Tegangan (V)	Base Metal (HV)	HAZ (HV)	Weld Metal (HV)
160	20	145	158	152
200	25	148	165	160
250	30	143	150	147

Hasil pengujian pada Tabel 3 menunjukkan bahwa nilai kekerasan tertinggi terdapat pada daerah HAZ pada kondisi 25 V/200 A, yaitu sebesar 165 HV. Nilai kekerasan logam induk relatif konstan pada kisaran 143–148 HV di seluruh variasi,

mengindikasikan bahwa parameter pengelasan yang diterapkan tidak memengaruhi struktur mikro di luar zona pengaruh panas. Sementara itu, logam las menunjukkan nilai kekerasan menengah (147–160 HV) di antara BM dan HAZ.

Peningkatan kekerasan pada HAZ pada kondisi 200 A dikaitkan dengan laju pendinginan yang relatif cepat, yang mendorong penghalusan butir (*grain refinement*). Namun pada arus 250 A, nilai kekerasan HAZ menurun menjadi 150 HV akibat *grain coarsening* yang dipicu oleh *heat input* berlebih dan laju pendinginan yang melambat [14]. Fenomena ini menegaskan bahwa kenaikan arus meningkatkan kekerasan hanya hingga titik tertentu; setelah melewati ambang tersebut, panas masukan yang berlebih justru menurunkan kekerasan akibat transformasi struktur mikro dari ferit halus menjadi ferit kasar.

Dari ketiga variasi yang diuji, kondisi 25 V/200 A memberikan nilai kekerasan paling tinggi dan paling merata di antara BM HAZ WM. Temuan ini selaras dengan hasil uji *bending*, di mana parameter yang sama juga menghasilkan kekuatan lentur tertinggi (455,1 MPa). Kesesuaian ini memperkuat kesimpulan bahwa kombinasi 25 V/200 A merupakan kondisi pengelasan optimal untuk baja SS400 dengan gas pelindung CO₂.

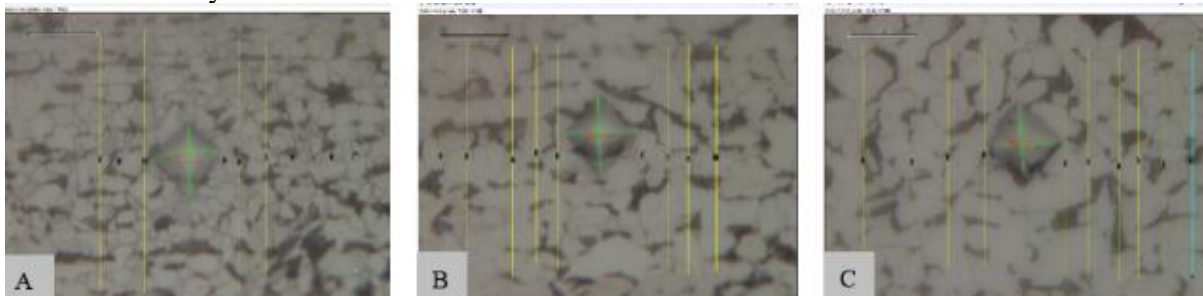
Kesesuaian antara distribusi kekerasan dan kekuatan lentur mengindikasikan adanya hubungan langsung antara kondisi metalurgi sambungan dan kemampuannya menahan beban mekanik: spesimen pada 200 A tidak hanya memiliki kekerasan HAZ

tertinggi, tetapi juga kemampuan menahan beban lentur terbaik. Dengan kata lain, distribusi kekerasan yang lebih merata dan tinggi pada daerah sambungan cenderung berbanding lurus dengan kapasitas material dalam menahan beban [15].

Apabila dibandingkan lebih lanjut dengan hasil uji *bending* yang telah dibahas sebelumnya, terlihat bahwa spesimen dengan arus 200 A tidak hanya menunjukkan nilai kekerasan yang relatif lebih tinggi, tetapi juga memiliki kemampuan menahan beban lentur yang paling baik. Pola ini semakin memperjelas adanya keterkaitan antara distribusi kekerasan pada sambungan las dan kekuatan mekanik yang dihasilkannya semakin merata dan tinggi distribusi kekerasan pada daerah sambungan, semakin besar pula kapasitas material dalam menahan beban [15].

3.4 Hasil Analisis Mikrostruktur

Pengamatan mikrostruktur dilakukan pada tiga zona utama sambungan, yaitu logam induk (*Base Metal*/BM), daerah pengaruh panas (*Heat Affected Zone*/HAZ), dan logam las (*Weld Metal*/WM). Permukaan potongan melintang terlebih dahulu dipersiapkan melalui tahapan penggosokan bertingkat (*grinding*) menggunakan amplas dengan variasi *grit* 400 hingga 2000, dilanjutkan dengan pemolesan (*polishing*) menggunakan autosol, serta proses *etching* menggunakan larutan Nital 2% untuk menampilkan batas butir secara jelas. Selanjutnya, pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop optik pada perbesaran 500x.



Gambar 4. Hasil observasi mikrostruktur dan indentasi pengujian kekerasan micro vickers (A) 20V, (B) 25 V, dan (C) 30V

Pengamatan mikrostruktur pada penelitian ini dilakukan menggunakan mikroskop metalografi pada tiga zona utama sambungan, yaitu logam las (*weld metal*/WM), daerah pengaruh panas (*heat affected zone*/HAZ), dan logam induk (*base metal*/BM). Sebelum diamati, sampel terlebih dahulu dipersiapkan melalui beberapa tahap, meliputi proses penggosokan (*grinding*), pemolesan (*polishing*), hingga proses etsa (*etching*) menggunakan larutan Nital. Tahapan preparasi ini bertujuan untuk menghaluskan permukaan sampel serta memperjelas batas-batas struktur mikro sehingga dapat diamati secara akurat di bawah mikroskop.

Setelah proses preparasi selesai, sampel diamati pada pembesaran tertentu untuk memperoleh citra mikrostruktur yang cukup jelas. Gambar yang dihasilkan dari pengamatan mikroskop ini selanjutnya digunakan sebagai data untuk analisis ukuran butir.

Analisis ukuran butir dilakukan menggunakan perangkat lunak ImageJ. Pada tahap awal, gambar mikrostruktur yang diperoleh terlebih dahulu dikalibrasi berdasarkan skala pembesaran mikroskop. Kalibrasi ini penting agar ukuran piksel pada gambar dapat dikonversi menjadi satuan panjang sebenarnya, yaitu mikrometer (μm). Setelah proses kalibrasi selesai, citra kemudian diolah dengan menyesuaikan kontras dan melakukan proses *threshold* agar batas-batas butir dapat terlihat lebih jelas [17].

Tahap berikutnya adalah proses pengukuran menggunakan fitur *Analyze Particles* yang tersedia pada ImageJ. Melalui fitur ini, ukuran butir pada daerah HAZ dapat dihitung dari setiap citra mikrostruktur yang dianalisis. Nilai ukuran butir yang diperoleh dari masing-masing sampel kemudian dirata-ratakan sehingga diperoleh nilai ukuran butir yang mewakili setiap variasi arus dan tegangan pengelasan yang digunakan pada penelitian ini [16].

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa rata-rata ukuran butir pada daerah HAZ mengalami peningkatan seiring

bertambahnya arus dan tegangan pengelasan. Pada parameter 20 V/160 A diperoleh ukuran butir rata-rata sebesar 61,08 μm , pada 25 V/200 A sebesar 73,71 μm , dan pada 30 V/250 A meningkat menjadi 95,14 μm .

Peningkatan ukuran butir ini menunjukkan adanya pengaruh signifikan *heat input* terhadap pertumbuhan butir (*grain growth*). Semakin tinggi arus dan tegangan, semakin besar energi panas yang masuk ke material, sehingga waktu pendinginan menjadi lebih lambat dan memungkinkan difusi atom berlangsung lebih lama. Kondisi ini mendorong terjadinya pertumbuhan butir yang lebih kasar pada daerah HAZ.

Fenomena ini juga membantu menjelaskan hasil pengujian mekanik yang telah diperoleh sebelumnya. Pada kondisi arus 200 A, struktur mikro yang terbentuk tergolong relatif lebih halus dan homogen dibandingkan kondisi 250 A, meskipun ukuran butirnya (73,71 μm) berada di atas kondisi 160 A. Struktur seperti ini umumnya memberikan sifat mekanik yang lebih baik [18]. Hal tersebut sejalan dengan hasil pengujian yang telah dilakukan, di mana pada parameter ini diperoleh nilai kekerasan yang lebih tinggi serta kekuatan *bending* yang paling optimal dibandingkan variasi lainnya.

Berbeda dengan kondisi tersebut, pada arus 250 A ukuran butir yang terbentuk cenderung lebih besar. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh panas yang masuk selama proses pengelasan yang lebih tinggi sehingga memicu pertumbuhan butir pada daerah HAZ. Struktur butir yang lebih kasar menyebabkan penurunan sifat mekanik material. Akibatnya, kemampuan material dalam menahan beban lentur menurun, yang pada akhirnya juga terlihat dari nilai kekerasan dan kekuatan *bending* yang lebih rendah dibandingkan kondisi yang lebih optimal.

Tabel 5. Ringkasan Hasil Pengamatan Mikrostruktur

Variasi Arus (A)	Variasi Tegangan (V)	Zona	Struktur Mikro Dominan	Ukuran Butir(μm)	Keterangan
160	20	HAZ	Ferrite + Pearlite halus	61,08	Pendinginan cepat, penetrasi dangkal
200	25	HAZ	Ferrite + Pearlite homogen	73,71	Struktur paling seragam Overheating, pendinginan lambat
250	30	HAZ	Butiran kasar (grain growth)	95,14	

Pada arus 160 A, struktur mikro di HAZ menunjukkan butiran ferit-perlit halus dengan fusi yang kurang sempurna akibat penetrasi yang terbatas. Pada arus 200 A, butiran lebih homogen dengan zona transisi yang jelas antara HAZ dan WM, menandakan pendinginan yang optimal. Sedangkan pada arus 250 A, tampak pertumbuhan butir besar akibat masukan panas tinggi, yang berdampak pada penurunan kekerasan dan kekuatan mekanik.

Peningkatan panas berlebih pada lasan dapat mempercepat pertumbuhan butir dan menurunkan kekuatan mekanik sambungan [6]. Oleh karena itu, parameter 25 V/200 A terbukti menghasilkan struktur mikro yang paling homogen dan seragam dibandingkan variasi lainnya, meskipun bukan yang memiliki ukuran butir terkecil keseragaman inilah yang berkontribusi terhadap distribusi sifat mekanik yang lebih merata pada kondisi tersebut.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi tegangan busur dan arus las terhadap cacat las, kekerasan, dan struktur mikro pada sambungan baja SS400 hasil pengelasan GMAW dengan gas pelindung CO₂. Hasil pengujian menunjukkan bahwa parameter 25 V/200 A menghasilkan kondisi optimal bebas cacat permukaan, kekerasan HAZ dan kekuatan lentur tertinggi (165 HV; 455,1 MPa), serta struktur mikro paling homogen sedangkan peningkatan arus lebih lanjut (30 V/250 A) justru menurunkan performa akibat *grain coarsening* akibat *overheating*.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada pembuktian empiris bahwa hubungan antara *heat input* dan kualitas sambungan las

bersifat non-monoton bukan linear seperti yang sering diasumsikan pada praktik pengelasan konvensional dan bahwa titik optimum tersebut hanya dapat diidentifikasi secara andal melalui pendekatan pengujian terintegrasi (NDT, DT, dan analisis mikrostruktur), bukan dari satu jenis pengujian tunggal. Pendekatan ini melengkapi kajian-kajian terdahulu yang umumnya membahas ketiga aspek tersebut secara terpisah sehingga menghasilkan metodologi evaluasi kualitas las yang lebih komprehensif dan dapat direplikasi untuk material baja karbon rendah sejenis.

Secara praktis, temuan ini memberikan dasar kuantitatif bagi penetapan batas ambang *heat input* yang aman dalam pengelasan GMAW–CO₂ pada baja SS400, sebagai acuan awal bagi optimasi parameter di industri manufaktur dan konstruksi yang menggunakan material serupa.

Referensi

- [1] Juwanda, Saifuddin & Marzuki., 2021. Analisa pengaruh kuat arus hasil pengelasan GMAW terhadap kekerasan material ASTM A 36. J. Weld. Technol. 3, 6–11.
- [2] Prasetyo, I. & Towijaya, T., 2021. Peningkatan Kualitas Produk Lasan Bagi Umkm Bengkel Las Se-Kota Dan Kabupaten Pekalongan. Abdi Masya 5, 150–156.
- [3] Herdiansah, Y. & Cendana, W. P., 2025. Evaluasi Kuat Tekan Beton Terpasang pada Struktur Dermaga Eksisting Berdasarkan Pengujian Destructive dan Non-Destructive. J. Tek. Sipil 21, 109–127.
- [4] Salahudin, X., Ihza, Y., Pramono, C. & Widodo, S., 2021. Analisis Kekuatan Tarik Baja Karbon Rendah Hasil

- Pengelasan Smaw Dengan Variasi Bentuk Kampuh Las. *J. Mech. Eng.* 5, 8–14.
- [6] Wahjudi, A. & Widodo, A. S., 2023. a Comprehensive Review on the Non-Destructive Test for Polymer Matrix Composite. *J. Rekayasa Mesin* 14, 987–1000.
- [7] Alwahidi, M. N., Najibah, S. & Afrizal, B., 2025. Review Pengujian Pengelasan Metode Non Destructive Test. *J. Mema (Jurnal Mesin dan Manufaktur)* 2, 30–42.
- [8] Hidayat, M. N., Muddin, S. & Musrawati., 2024. Analisis Cacat Sambungan Pengelasan SMAW 3G Pada Pelat Baja ST60 Dengan Variasi Arus Menggunakan NDT (Nondestructive Test) Ultrasonic Test Dan Penetrant Test. *Al-Gazali J. Mech. Eng.* 50-59.
- [9] Syaifudin, W., 2024. Analisa Root Welding Pengelasan FCAW (Flux-Cored Arc Welding) Dengan Backing Plate Berbasis Semen Dan Pasir Silika Terhadap Kekuatan Bending Dan J. Tek. Mesin.
- [10] Avilla, G., Suhendra, B., Tek. Mesin 2023. Kuat Arus Dan Kelembapan Elektroda Pada Pengelasan Smaw Terhadap Cacat Las Pada Pengelasan Baja Ss400 Dengan Metode Kaji.
- [11] Fajar Ari Setyawan, Togik Hidayat, A. D. A., 2021. ANALISIS PENETRASI DAN KEKUATAN TARIK BAJA ST 37 TERHADAP VARIASI ARUS DAN KECEPATAN DENGAN PENGELASAN METAL ACTIVE GAS. 2, 7–14.
- [12] Aditiawan, D. & Tnunay, I. A., 2025. Analisis Pengaruh Kecepatan Angin terhadap Pembentukan Cacat Porosity pada Pengelasan GTAW dengan Material Pelat Grade A dan Elektroda. 10.
- [13] Wahjudi, A. & Widodo, A. S., 2023. a Comprehensive Review on the Non-Destructive Test for Polymer Matrix Composite. *J. Rekayasa Mesin* 14, 987–1000.
- [14] M. Shafeek, S. Suranjan, D. Doreswamy, and H. K. Sachidananda, “Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of GMAW welded S275 steel.
- [15] S. Kou. 2003. *Welding Metallurgy*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley-Interscience,.
- [16] A. Kumar et al., “Influence of heat input on mechanical characteristics... ASTM A36 steel,” *Heliyon*.
- [17] C. T. Rueden et al., “ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data,” *BMC Bioinformatics*,
- [18] M. Willett and P. Johnson, 2018. “Introduction to image analysis using ImageJ,” University of Southampton Imaging Centre