

Effect of Current Variation on the Mechanical Properties and Microstructure of GTAW-Welded SS400 Steel

Hasan^{1*}, Muchammad Chusnan Aprianto¹, Johan Maulana¹, Ghany Heryana²,
Epa Rosidah Apipah³

¹Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer,
Universitas Islam DR KHEZ Muttaqien

Jl. Syekh Baing Yusuf Nomor 35 Purwakarta, Jawa Barat, Indonesia

²Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Presiden

Jl. Ki Hajar Dewantara, Kota Jababeka, Bekasi, Jawa Barat, Indonesia

³Prodi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer,
Universitas Islam DR KHEZ Muttaqien

Jl. Syekh Baing Yusuf Nomor 35 Purwakarta, Jawa Barat, Indonesia

*Corresponding author: hasan@unismu.ac.id; 2016hasanhasan@gmail.com

Abstract

This study aims to investigate the effect of GTAW current variation on the tensile strength, hardness, and microstructural characteristics of SS400 steel with different plate thicknesses. An experimental approach was employed using SS400 steel plates with thicknesses of 1.2 mm, 5 mm, and 6 mm. Welding was conducted using three different current levels, producing a total of 27 welded specimens. Tensile properties were evaluated using a universal testing machine, hardness was measured using the Rockwell hardness test, and microstructural observations were performed through optical metallography. The results indicate that both welding current and plate thickness significantly influence the mechanical properties and microstructure of the welded joints. Increasing welding current and plate thickness leads to a reduction in yield strength and ultimate tensile strength due to increased heat input. Hardness values decrease with higher welding currents, while lower currents result in increased hardness. Microstructural analysis shows that martensitic structures are formed predominantly in medium-thickness plates (5 mm), whereas thin (1.2 mm) and thick (6 mm) plates are dominated by ferrite–pearlite phases, accompanied by grain coarsening at higher current levels. These findings demonstrate that optimizing welding current according to material thickness is essential to achieve favorable mechanical performance and controlled microstructural characteristics in GTAW-welded SS400 steel.

Keywords: SS400 Steel; GTAW; Mechanical Properties; Metallography; Welding Current.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi arus pengelasan GTAW terhadap kekuatan tarik, kekerasan, dan karakteristik mikrostruktur baja SS400 dengan ketebalan pelat yang berbeda. Metode eksperimen digunakan dengan material baja SS400 yang memiliki ketebalan 1,2 mm, 5 mm, dan 6 mm. Proses pengelasan dilakukan menggunakan tiga tingkat arus yang berbeda sehingga menghasilkan total 27 spesimen las. Sifat tarik diuji menggunakan mesin uji tarik universal, kekerasan diukur dengan metode uji kekerasan Rockwell, dan pengamatan mikrostruktur dilakukan melalui metalografi optik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arus pengelasan dan ketebalan pelat berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur sambungan las. Peningkatan arus pengelasan dan ketebalan pelat menyebabkan penurunan tegangan luluh dan kekuatan tarik maksimum akibat meningkatnya masukan panas. Nilai kekerasan menurun pada arus pengelasan yang lebih tinggi, sedangkan arus yang lebih rendah menghasilkan kekerasan yang lebih tinggi. Analisis mikrostruktur menunjukkan bahwa struktur martensit terbentuk dominan pada pelat dengan ketebalan sedang (5 mm), sedangkan pelat tipis (1,2 mm) dan pelat tebal (6 mm) didominasi oleh fasa ferit–perlit dengan kecenderungan pertumbuhan butir pada tingkat arus yang lebih tinggi. Temuan ini menunjukkan bahwa optimasi arus pengelasan sesuai dengan ketebalan material sangat penting untuk memperoleh kinerja mekanik yang baik dan karakteristik mikrostruktur yang terkendali pada baja SS400 hasil pengelasan GTAW.

Kata kunci: Baja SS400; GTAW; Sifat Mekanik; Metalurgi; Arus Pengelasan.

1. Pendahuluan

Pengelasan merupakan salah satu teknik penyambungan logam yang sangat

penting dalam industri manufaktur dan konstruksi, karena memungkinkan terbentuknya sambungan yang kuat dan

permanen. Salah satu metode pengelasan yang dikenal menghasilkan kualitas sambungan tinggi adalah *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) atau yang sering disebut juga *Tungsten Inert Gas* (TIG) Welding. Metode ini menggunakan elektroda tungsten yang tidak mencair dan gas pelindung inert, seperti Argon, untuk melindungi logam cair dari kontaminasi atmosfer [1].

GTAW sangat cocok digunakan untuk mengelas logam ferrous maupun non-ferrous, termasuk baja karbon rendah seperti baja SS400. Baja SS400 merupakan salah satu jenis baja struktural yang banyak digunakan di bidang teknik dan konstruksi karena memiliki sifat mekanik yang baik, harga yang terjangkau, dan kemudahan dalam proses fabrikasi [2]. Namun, seperti logam lainnya, karakteristik hasil las pada baja SS400 sangat bergantung pada parameter proses pengelasan, salah satunya adalah variasi arus listrik.

Variasi arus dalam proses GTAW berpengaruh signifikan terhadap penetrasi, lebar daerah pengaruh panas (*heat affected zone* atau HAZ), kekerasan, dan kekuatan tarik sambungan las [3]. Arus yang terlalu rendah menghasilkan penetrasi dangkal dan sambungan lemah, sedangkan arus yang terlalu tinggi dapat menyebabkan cacat seperti undercut, porositas, serta deformasi termal [4]. Oleh karena itu, penting untuk mengetahui batas optimal variasi arus agar dapat dihasilkan sambungan las dengan sifat mekanik yang maksimal.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa peningkatan arus dalam batas tertentu dapat meningkatkan kekuatan sambungan karena penetrasi yang lebih baik dan penggabungan antar logam dasar yang lebih sempurna [5]. Namun, arus yang terlalu besar juga memperbesar zona HAZ dan memengaruhi struktur mikro, yang dapat menurunkan kekerasan dan ketahanan terhadap retak [6], [7]. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara eksperimental pengaruh variasi arus pada proses pengelasan GTAW terhadap sifat mekanik baja SS400, khususnya terhadap kekuatan tarik, kekerasan, dan struktur

mikro. Baja SS400 yang menjadi spesimen memiliki tiga variasi ketebalan (1,2 mm, 5 mm, 6 mm), sehingga diperoleh pola hubungan arus dengan hasil pengelasan pada ketebalan berbeda-beda.

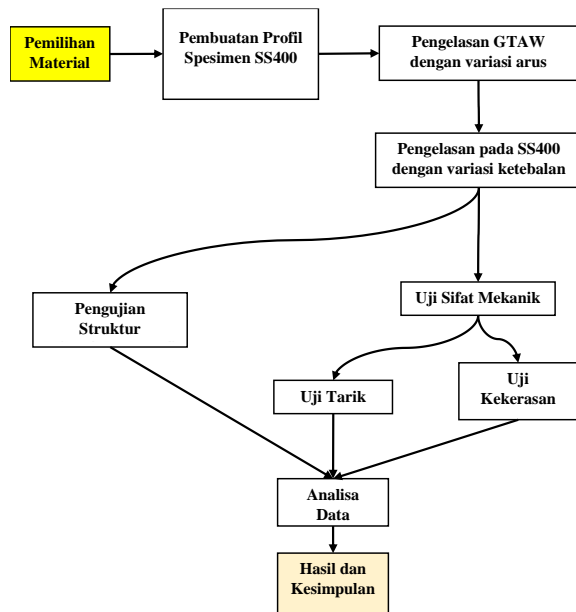
Berbagai penelitian terkait pengelasan GTAW serta penelitian tentang material baja SS400 telah banyak dilakukan. Pengelasan laser hibrid-GTAW pernah diimplementasikan pada baja karbon rendah 304 yang bersifat austenitik. Selain itu, studi eksperimental dilakukan untuk meningkatkan manik GMAW dan TIG yang diproduksi secara aditif menggunakan FSP [8] dan sifat mekanik pada baja stainless AISI 304 dan AISI 316 [9]. Demikian pula untuk sambungan material AISI2205 and EN10025 telah dilakukan studi karakteristik gas tungsten pada pengelasan GTAW [10]. Terkait material baja SS400, telah dilakukan kajian pengelasan GTAW untuk meningkatkan resistensi bending fatigue [11] dan pengaruh teknik pengerasan heterogen pada struktur mikro di sambungan baja stainless 316L dengan baja SS400 [12]. Selain itu, terdapat kajian tentang penyambungan non homogen antara aluminium A7075 dengan baja SS400 menggunakan pengelasan gesekan linear dua sisi, dengan menganalisis karakteristik pemrosesan, mekanik, dan struktur mikro [13]. Studi terbaru yaitu kajian tentang sifat elektroplastik SS400 dengan metode deep learning Bayesian [14].

Berdasarkan uraian di atas, studi tentang pengelasan GTAW pada baja SS400 masih belum mendalam. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan kajian pengaruh arus GTAW pada kualitas pengelasan baja SS400 (variasi ketebalan bahan) berdasarkan sifat mekanik yaitu kekuatan tarik, kekerasan, dan struktur mikro. Sehingga penelitian ini bertujuan untuk mencari pengaruh arus pengelasan GTAW terhadap sifat mekanik dan struktur mikro hasil pengelasan pada baja SS400. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mencari arus optimal agar hasil pengelasan memiliki kualitas baik.

2. Metode Penelitian

2.1. Diagram Alir Penelitian

Metode pendekatan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental. Variabel penelitian yang diukur adalah arus pengelasan, ketebahan material SS400, kekuatan tarik, kekerasan material, dan perubahan struktur mikro. Alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian diawali dengan pemilihan material, pembuatan profil, pengelasan, pengujian sifat mekanik dan struktur mikro, analisa data, penarikan kesimpulan. Bahan penelitian yang dipakai adalah baja SS400 dengan ketebalan 1,2 mm, 5 mm, dan 6 mm. Setelah itu, dilakukan pembuatan profil pada bahan dengan ukuran 100 mm x 200 mm. Satu sisi bahan berukuran 100 mm dibentuk sudut kampuh $\theta = 45^\circ$, kemudian dilakukan pengelasan pada dua sambungan dengan variasi arus 110 A, 120 A, 130 A dengan variasi ketebalan 1,2 mm, 5 mm, dan 6 mm. Selanjutnya dilakukan uji sifat mekanik dan uji struktur mikro.

2.2. Pengujian Sifat Mekanik

Pengujian sifat mekanik melalui dua metode yaitu uji tarik dan uji kekerasan. Uji tarik dilakukan dengan mesin uji tarik untuk mengetahui kekuatan tarikan (N/m), Yield Strength, dan Ultimate Tensile Strength.

Sedangkan uji kekerasan dilakukan dengan metode Rockwell skala A.

2.2.1 Uji tarik

Pengujian tarik mengacu pada standar ISO 6892-1. Langkah-langkah pengujian yang mengacu pada standar ini adalah sebagai berikut:

a. Persiapan spesimen

Spesimen uji tarik dibuat sesuai dengan dimensi dan geometri yang ditetapkan dalam standar ASTM E8/E8M atau ISO 6892-1. Spesimen dapat berbentuk *round specimen* atau *flat specimen* tergantung pada bentuk material awal. Permukaan spesimen harus halus, bebas dari cacat, retak, atau goresan yang dapat memengaruhi hasil pengujian. Panjang ukur (*gauge length*) dan luas penampang awal diukur secara akurat menggunakan alat ukur presisi.

b. Kalibrasi dan persiapan mesin uji

Mesin uji tarik (Universal Testing Machine/UTM) dikalibrasi sebelum pengujian untuk memastikan keakuratan pembacaan gaya dan regangan. Grip atau penjepit dipasang sesuai dengan jenis spesimen untuk mencegah slip selama pengujian. Sistem pengukuran regangan, seperti extensometer, dipasang pada bagian *gauge length* spesimen sesuai standar.

c. Pemasangan spesimen

Spesimen dipasang secara lurus dan simetris di antara grip mesin uji tarik untuk menghindari pembebanan eksentrik. Penjepitan dilakukan dengan kuat namun tidak menyebabkan deformasi awal pada spesimen. Posisi extensometer diperiksa kembali untuk memastikan pembacaan regangan yang akurat.

d. Pelaksanaan pengujian

Pengujian dilakukan dengan memberikan beban tarik secara aksial dan kontinu pada spesimen dengan laju regangan atau laju pembebanan yang telah ditentukan oleh standar. Pada standar ISO 6892-1, metode pengujian dapat dilakukan menggunakan *strain rate control* atau *stress rate control*. Pembebanan dilanjutkan hingga spesimen mengalami patah.

e. Pencatatan data

Selama pengujian, data gaya dan regangan direkam secara kontinu oleh sistem akuisisi data mesin uji. Parameter utama yang dicatat meliputi gaya maksimum, regangan, dan kurva tegangan-regangan. Setelah spesimen patah, panjang akhir dan luas penampang akhir diukur untuk perhitungan elongasi dan reduksi luas penampang.

f. Analisis dan pelaporan hasil

Data hasil pengujian digunakan untuk menentukan sifat mekanik material, meliputi tegangan luluh (*yield strength*), kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*), regangan total (*elongation*), dan reduksi luas penampang (*reduction of area*). Kurva tegangan-regangan dianalisis untuk mengevaluasi perilaku elastis dan plastis material sesuai teori mekanika bahan. Hasil pengujian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik, disertai keterangan standar pengujian yang digunakan. Laporan pengujian mencantumkan jenis material, dimensi spesimen, parameter pengujian, serta kondisi pengujian untuk menjamin keterulangan dan validitas hasil.

Tegangan dihitung menggunakan persamaan 1, sedangkan regangan dihitung menggunakan persamaan 2.

$$\sigma = F/A_0 \quad 1$$

$$\varepsilon = (L - L_0)/L_0 \quad 2$$

Dengan σ adalah tegangan (N/mm^2), ε adalah regangan (%), F adalah gaya tarik (N), A_0 adalah luas penampang awal (mm^2), L_0 adalah panjang awal spesimen (mm), L adalah panjang akhir spesimen (mm).

Modulus elastisitas, kekuatan luluh, kekuatan tarik maksimum, kekuatan patah, dan elongasi dihitung menggunakan persamaan di bawah ini.

$$E = \sigma / \varepsilon \quad 3$$

$$\sigma_y = F_y/A_0 \quad 4$$

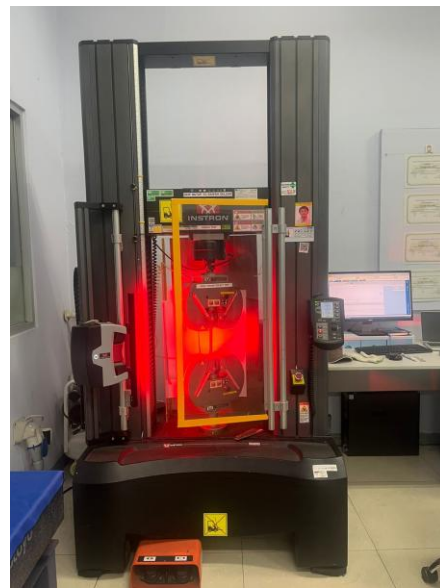
$$\sigma_u = F_{max}/A_0 \quad 5$$

$$\sigma_f = F_f/A_0 \quad 6$$

$$\delta = \frac{L_f - L_0}{L_0} 100\% \quad 7$$

Dengan E adalah modulus elastisitas (N/mm^2), σ_y adalah kekuatan luluh

(N/mm^2), F_y adalah gaya saat terjadi luluh (N), σ_u adalah kekuatan tarik maksimum (N/mm^2), F_{max} adalah gaya tarik maksimum (N), σ_f adalah kekuatan patah (N/mm^2), F_f adalah gaya pada saat patah (N), δ adalah persen perpanjangan (elongasi) (%), L_f adalah panjang spesimen setelah patah (mm). Selain itu, uji tarik dilakukan untuk mengetahui batas wilayah elastis dan plastis pada sambungan las. Uji tarik dilakukan di Laboratorium Terpadu Fakultas Teknik Universitas Buana Perjuangan Karawang.



Gambar 2. Pengujian Tarik

2.2.2 Uji kekerasan

Uji kekerasan dilakukan dengan *Rockwell* skala A yang mengacu pada standar ISO 6508-1. Tujuan uji ini untuk mengetahui batas maksimal material terhadap deformasi bahan secara permanen. Langkah-langkah pengujian nya adalah sebagai berikut:

a. Persiapan spesimen

Spesimen uji disiapkan dengan permukaan yang rata, bersih, dan bebas dari kotoran, minyak, oksida, atau lapisan pelindung lainnya. Permukaan uji harus cukup halus untuk memastikan penetrasi indenter yang seragam dan akurat. Ketebalan spesimen harus memenuhi ketentuan standar, yaitu minimal sepuluh kali kedalaman penetrasi indenter, untuk menghindari pengaruh substrat atau deformasi balik.

b. Persiapan dan kalibrasi alat uji

Mesin uji kekerasan Rockwell dikalibrasi sesuai prosedur standar menggunakan *reference test blocks* yang memiliki nilai kekerasan terverifikasi. Indentor yang digunakan untuk skala A adalah diamond cone (Brake) dengan sudut puncak 120°. Beban pengujian diatur sesuai standar, yaitu beban minor sebesar 10 kgf dan beban mayor sebesar 60 kgf, sehingga total beban pengujian adalah 60 kgf.

c. Penempatan spesimen

Spesimen diletakkan pada landasan (*anvil*) mesin uji dengan posisi stabil dan permukaan uji tegak lurus terhadap indentor. Kontak awal antara indentor dan permukaan spesimen dilakukan secara perlahan untuk mencegah kesalahan pembacaan akibat benturan atau ketidaksejajaran.

d. Pemberian beban minor

Beban minor sebesar 10 kgf diterapkan terlebih dahulu untuk menetapkan posisi nol dan memastikan kontak awal yang konsisten antara indentor dan permukaan spesimen. Setelah beban minor tercapai, dial atau sistem pembacaan disetel ke nol sesuai prosedur alat.

e. Pemberian beban mayor

Beban mayor sebesar 60 kgf kemudian diterapkan secara bertahap hingga mencapai total beban pengujian. Beban dipertahankan selama waktu penahanan (*dwell time*) yang ditentukan oleh standar, biasanya antara 2–6 detik, untuk memastikan penetrasi indentor yang stabil.

f. Pelepasan beban dan pembacaan nilai

Setelah waktu penahanan terpenuhi, beban mayor dilepaskan sementara beban minor tetap dipertahankan. Nilai kekerasan Rockwell skala A (HRA) kemudian dibaca langsung dari dial atau sistem digital mesin uji berdasarkan kedalaman penetrasi permanen indentor.

g. Pengulangan pengujian

Pengujian dilakukan minimal tiga kali pada lokasi yang berbeda pada spesimen yang sama. Jarak antar titik indentasi harus memenuhi ketentuan standar, yaitu minimal tiga kali diameter indentasi dari tepi

spesimen atau dari indentasi lainnya, untuk menghindari pengaruh deformasi sebelumnya.

e. Analisis dan pelaporan data

Nilai kekerasan yang diperoleh dirata-ratakan dan disajikan sebagai nilai kekerasan Rockwell skala A. Laporan pengujian mencantumkan jenis material, skala Rockwell yang digunakan (HRA), jenis indentor, beban pengujian, jumlah titik pengujian, serta standar acuan yang digunakan.

2.3. Pengujian Struktur Mikro

Uji struktur mikro dilakukan dengan standar ISO 9042. Uji ini bertujuan untuk melihat struktur paduan spesimen setelah pengelasan secara mikroskopik seperti pembentukan struktur ferit, perlit, dan lainnya. Selain itu, struktur mikro dilakukan untuk mengidentifikasi cacat material pada sambungan las GTAW. Langkah-langkah uji ini sebagai berikut:

a. Pengambilan spesimen

Spesimen metalografi diambil dari bagian material atau sambungan las yang akan diamati, seperti daerah logam induk (*base metal*), daerah terpengaruh panas (*Heat Affected Zone/HAZ*), dan logam las (*weld metal*). Pemotongan dilakukan menggunakan mesin pemotong presisi dengan pendingin untuk mencegah perubahan mikrostruktur akibat panas berlebih selama proses pemotongan.

b. Mounting

Spesimen dilakukan proses pelapisan dengan resin, bertujuan untuk memudahkan penanganan spesimen saat pemolesan dan proses selanjutnya.

c. Pengamplasan dan pemolesan (*polishing*)

Spesimen yang telah dimounting kemudian dilakukan pemolesan untuk memisahkan senyawa pengotor dari pengelasan dan memperhalus permukaan agar lebih mudah diamati.

d. Pemberian *etsa*

Spesimen diberikan larutan *etsa vellela* (HCl : Etanol : H₂O) untuk meningkatkan kontras struktur mikro.

e. Pemotretan obyek mikrostruktur

Spesimen yang telah dietsa diamati menggunakan mikroskop optik metalografi dengan variasi perbesaran (misalnya 100x, 200x, 500x, dan 1000x). Pengamatan difokuskan pada identifikasi fasa mikrostruktur, ukuran dan bentuk butir, serta perbedaan struktur antara logam induk, HAZ, dan logam las. Citra mikrostruktur direkam menggunakan kamera digital yang terintegrasi dengan mikroskop. Analisis kualitatif dilakukan untuk mengidentifikasi fasa (ferit, perlit, martensit), sedangkan analisis kuantitatif, seperti pengukuran ukuran butir, dapat dilakukan jika diperlukan menggunakan perangkat lunak analisis citra sesuai standar yang berlaku.



Gambar 4. Spesimen pada Uji Struktur Mikro.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Pengujian Kekerasan

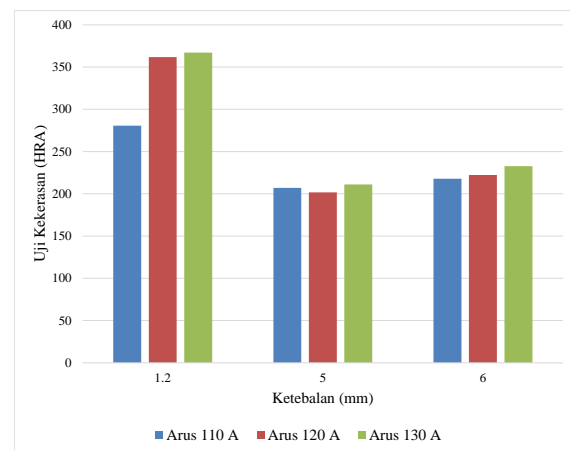
Tabel 1. Hasil Pengujian Kekerasan.

Tebal (mm)	Rerata Arus Pengelasan (A)	Rerata Nilai Uji Kekerasan (HRA)
1.2	110	280,6
1.2	120	361,7
1.2	130	367,1
5	110	207,0
5	120	201,7
5	130	211,1
6	110	217,8
6	120	222,3
6	130	232,7

Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode *Rockweel* skala A dengan

mengukur kedalaman penetrasi indenter pada permukaan material dengan beban tertentu. Indenter pada metode ini berbentuk kerucut intan dengan sudut 120° dan beban uji 60 kgf. Metode ini sesuai dipergunakan untuk material tipis atau dengan kekerasan sedang-menengah. Hasil Pengujian ditunjukkan pada Tabel 1.

Berdasarkan Tabel 1, dapat disusun grafik hasil pengujian kekerasan seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



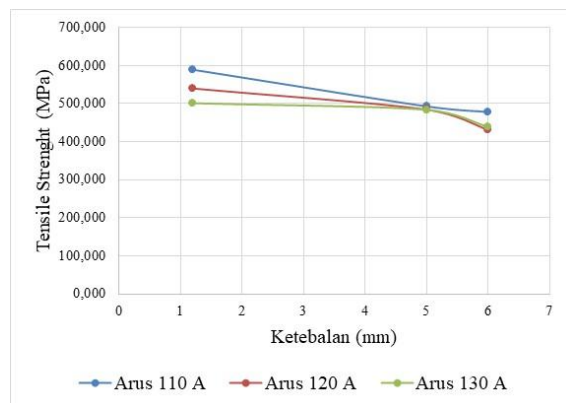
Gambar 5. Grafik Hasil Uji Kekerasan.

Baja SS400 adalah baja karbon rendah yang relatif lunak dengan kandungan karbon sekitar 0,05–0,25%. Kekerasan baja ini sangat dipengaruhi oleh masukan panas (*heat input*) saat proses pengelasan. Berdasarkan data di atas, pada arus 110 A (*heat input* rendah), kekerasan cenderung lebih tinggi karena pendinginan relatif cepat, sehingga sebagian struktur mikro dapat membentuk fasa yang lebih keras (misalnya bainit/martensit dalam jumlah kecil). Sedangkan pada arus 120 A (*heat input* sedang), kekerasan dapat sedikit menurun atau stabil. Pada kondisi ini, masukan panas lebih besar sehingga pendinginan melambat, menghasilkan struktur dominan ferit–perlit yang lebih lunak. Terakhir untuk arus 130 A (*heat input* tinggi), kekerasan umumnya lebih rendah dibanding arus kecil, karena pendinginan semakin lambat. Pendinginan lambat ini menyebabkan terbentuknya struktur mikro yang didominasi ferit–perlit dengan butir yang lebih kasar, sehingga nilai HRA menurun.

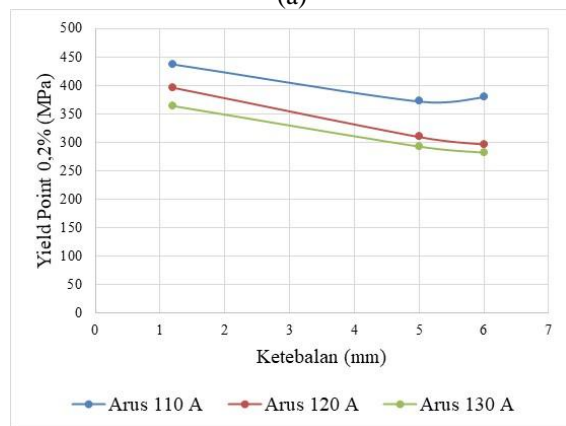
Pada pelat tipis (1,2 mm), arus besar menyebabkan pendinginan relatif cepat pada zona las, sehingga justru meningkatkan kekerasan. Sedangkan pada pelat tebal (5–6 mm), kenaikan arus menyebabkan pelepasan panas lebih lambat, sehingga nilai kekerasan relatif lebih rendah.

3.2. Hasil Uji Tarik

Arus pengelasan pada GTAW berpengaruh terhadap suhu pengelasan. Semakin tinggi arus, maka suhu pengelasan semakin tinggi. Hasil Uji Tarik ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7.



(a)



(b)

Gambar 6. Hasil Uji Tarik Baja SS400.

Gambar 6 (a) menunjukkan hubungan antara ketebalan dengan nilai Tensile Strength (kekuatan tarik maksimum) baja SS400. Nilai *tensile strength* cenderung menurun dengan bertambahnya ketebalan. Arus 110 A menghasilkan nilai kekuatan tarik paling tinggi, yakni sekitar 590 MPa pada ketebalan 1 mm, kemudian menurun hingga sekitar 480 MPa pada ketebalan 6 mm. Sedangkan arus 120 A dan 130 A

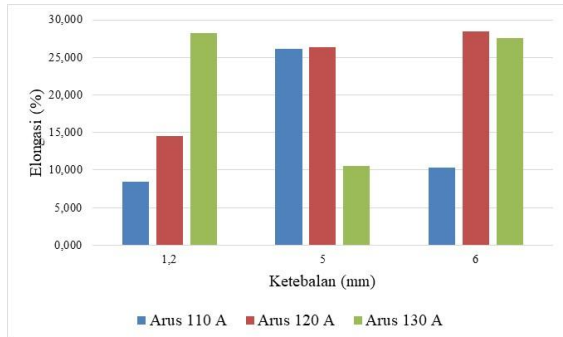
menunjukkan nilai *tensile strength* lebih rendah, dengan penurunan yang lebih signifikan pada ketebalan besar, di mana arus 130 A pada 6 mm hanya mencapai sekitar 430 MPa. Fenomena ini dapat dijelaskan karena semakin tinggi arus dan ketebalan, masukan panas (*heat input*) meningkat, sehingga pendinginan berlangsung lebih lambat, menghasilkan butir mikrostruktur yang lebih kasar dan berimplikasi pada penurunan sifat mekanik sambungan.

Gambar 6 (b) menunjukkan hubungan antara ketebalan sambungan baja SS400 dengan nilai Yield Point 0,2% (MPa) pada arus pengelasan GTAW 110 A, 120 A, dan 130 A. Terlihat bahwa semakin bertambah ketebalan, nilai yield strength cenderung menurun pada semua variasi arus. Nilai tertinggi dicapai pada arus 110 A dengan ketebalan 1 mm sekitar 440 MPa, sedangkan nilai terendah berada pada arus 130 A dengan ketebalan 6 mm sekitar 290 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar ketebalan dan semakin tinggi arus yang digunakan, kemampuan baja menahan tegangan awal plastis berkurang akibat pengaruh panas las yang lebih tinggi, sehingga struktur mikro mengalami pelemahan.

Berdasarkan perbandingan kedua grafik tersebut, menunjukkan bahwa kombinasi arus rendah (110 A) dengan ketebalan tipis memberikan sifat mekanik terbaik, baik dari sisi yield point maupun tensile strength. Sebaliknya, ketebalan besar dengan arus tinggi memperburuk kekuatan mekanik akibat pengaruh panas las yang lebih dominan terhadap perubahan mikrostruktur baja SS400.

Gambar 7 menunjukkan hasil elongasi untuk pengaruh variasi arus las GTAW (110 A, 120 A, dan 130 A) serta ketebalan sambungan baja SS400 terhadap kemampuan regangan material sebelum patah. Terlihat bahwa nilai elongasi berfluktuasi sesuai kombinasi arus dan ketebalan. Pada ketebalan 1,2 mm, arus 130 A menghasilkan elongasi tertinggi sekitar 28%, sedangkan arus 110 A hanya sekitar

8%, dan arus 120 A sekitar 14%. Hal ini menunjukkan bahwa pada material tipis, arus tinggi justru meningkatkan keuletan karena penetrasi lebih optimal dan distribusi panas lebih merata.



Gambar 7. Elongasi pada Uji Tarik Baja SS400.

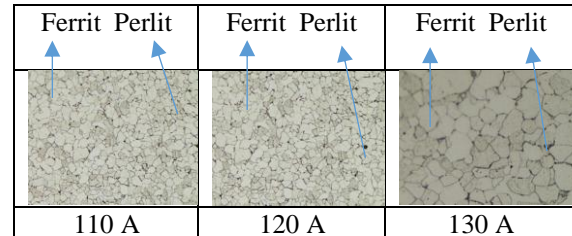
Pada ketebalan 5 mm, kondisi berubah. Elongasi tertinggi dicapai pada arus 110 A dan 120 A dengan nilai sekitar 26%, sedangkan pada arus 130 A justru turun drastis hanya sekitar 11%. Artinya, untuk ketebalan sedang, penggunaan arus terlalu tinggi menyebabkan input panas berlebihan sehingga struktur logam mengalami kerapuhan akibat pertumbuhan butir yang kasar. Pada ketebalan 6 mm, elongasi kembali meningkat pada arus 120 A dan 130 A, masing-masing sekitar 29% dan 28%, jauh lebih tinggi dibandingkan arus 110 A yang hanya sekitar 10%. Hal ini mengindikasikan bahwa untuk material tebal, dibutuhkan arus yang lebih besar agar penetrasi las sempurna sehingga ikatan logam lebih homogen dan mampu menahan regangan lebih tinggi.

Grafik ini memperlihatkan bahwa hubungan antara arus, ketebalan, dan elongasi tidak bersifat linear, melainkan sangat dipengaruhi oleh keseimbangan antara input panas dan ketebalan material. Arus rendah cenderung cocok untuk ketebalan sedang, sementara arus tinggi lebih efektif pada material tipis maupun tebal agar sambungan tetap plastis dan memiliki keuletan yang baik.

3.3. Hasil Pengujian Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro bertujuan untuk melihat perubahan struktur pada sambungan setelah dilakukan pengelasan GTAW.

Struktur mikro sambungan baja SS400 pada ketebalan 1,2 mm yang ditunjukkan pada gambar di atas merupakan hasil pengelasan GTAW dengan variasi arus 110 A, 120 A, dan 130 A. Struktur mikro yang terbentuk didominasi oleh fasa ferrit (berwarna terang) dan perlit (berwarna lebih gelap).



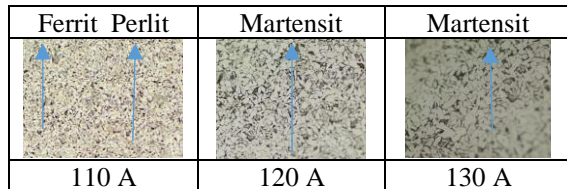
Gambar 8. Struktur Mikro Sambungan SS400 pada Ketebalan 1,2 mm.

Pada arus 110 A, struktur mikro menunjukkan distribusi ferrit dan perlit yang cukup seimbang dengan butiran yang relatif halus, menandakan pendinginan yang masih cukup cepat sehingga perlit terbentuk dalam jumlah lebih banyak. Pada arus 120 A, terlihat bahwa ukuran butir ferrit mulai membesar dengan distribusi perlit yang lebih merata, hal ini disebabkan oleh masukan panas yang lebih tinggi sehingga laju pendinginan melambat dan memungkinkan pertumbuhan butir.

Sedangkan pada arus 130 A, butir ferrit tampak lebih kasar dan perlit terbentuk dalam koloni yang lebih jelas dengan jumlah yang sedikit berkurang dibanding arus lebih rendah. Kondisi ini menunjukkan bahwa semakin tinggi arus las, masukan panas meningkat sehingga laju pendinginan semakin lambat, menyebabkan pertumbuhan butir ferrit yang lebih besar dan proporsi perlit relatif menurun. Hal ini berimplikasi pada sifat mekanik, di mana struktur dengan butiran halus (110 A) cenderung lebih keras dan kuat, sementara pada arus lebih tinggi (130 A) sifat baja menjadi lebih lunak dan ulet karena dominasi ferrit berbutir kasar.

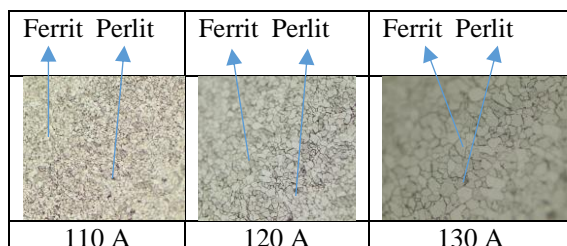
Struktur mikro sambungan baja SS400 dengan ketebalan 5 mm yang ditunjukkan pada gambar 9. Gambar tersebut menunjukkan hasil pengelasan GTAW dengan perbedaan fasa yang cukup

kelas pada variasi arus 110 A, 120 A, dan 130 A. Pada arus 110 A, mikrostruktur didominasi oleh ferrit (fase terang) dan perlit (fase lebih gelap) dengan distribusi merata, menunjukkan bahwa masukan panas relatif rendah sehingga pendinginan terjadi lebih lambat dan menghasilkan fasa ekuilibrium.



Gambar 9. Struktur Mikro Sambungan SS400 pada Ketebalan 5 mm.

Namun, pada arus 120 A mulai terbentuk martensit yang tampak sebagai jarum-jarum halus berwarna lebih gelap. Kehadiran martensit ini menandakan adanya daerah yang mengalami pendinginan cepat akibat kombinasi masukan panas yang lebih tinggi dan ketebalan material yang lebih besar, sehingga transformasi austenit ke martensit dapat terjadi. Pada arus 130 A, struktur martensit terlihat semakin dominan dengan ukuran jarum yang lebih kasar, menandakan bahwa semakin tinggi arus las, masukan panas semakin besar sehingga daerah terpengaruh panas (HAZ) juga semakin luas, memicu pembentukan martensit di sebagian besar area. Dengan demikian, perbedaan arus las pada baja SS400 tebal 5 mm sangat memengaruhi jenis fasa yang terbentuk, di mana arus rendah cenderung menghasilkan ferrit-perlit yang lebih ulet, sedangkan arus lebih tinggi mendorong terbentuknya martensit yang lebih keras namun getas.



Gambar 10. Struktur Mikro Sambungan SS400 pada Ketebalan 6 mm.

Struktur mikro sambungan baja SS400 dengan ketebalan 6 mm hasil

pengelasan GTAW menunjukkan dominasi fasa ferrit (berwarna terang) dan perlit (berwarna lebih gelap) pada seluruh variasi arus pengelasan 110 A, 120 A, dan 130 A. Fenomena ini sesuai dengan teori diagram fasa Fe–C, di mana baja SS400 yang tergolong baja karbon rendah (kadar karbon < 0,25%) pada kondisi pendinginan normal cenderung membentuk struktur ekuilibrium berupa ferrit dan perlit.

Pada arus pengelasan 110 A, masukan panas (*heat input*) relatif lebih rendah sehingga laju pendinginan berlangsung lebih cepat. Berdasarkan teori kinetika transformasi fasa, laju pendinginan yang lebih tinggi membatasi difusi atom karbon, sehingga pertumbuhan butir ferrit menjadi lebih halus dan perlit terbentuk dalam jumlah yang relatif lebih banyak serta terdistribusi di sepanjang batas butir. Struktur butir halus ini umumnya berkorelasi dengan peningkatan kekerasan dan kekuatan mekanik sesuai dengan hubungan Hall–Petch.

Ketika arus pengelasan ditingkatkan menjadi 120 A, masukan panas meningkat dan menyebabkan laju pendinginan menurun. Kondisi ini memberikan waktu yang lebih lama bagi difusi atom, sehingga terjadi pertumbuhan butir ferrit dan distribusi perlit yang lebih merata. Menurut teori pertumbuhan butir, peningkatan masukan panas selama proses pengelasan mempercepat mekanisme *grain coarsening*, yang secara bertahap dapat menurunkan kekuatan dan kekerasan material.

Pada arus pengelasan tertinggi, yaitu 130 A, masukan panas yang besar menyebabkan pendinginan berlangsung paling lambat. Akibatnya, struktur mikro didominasi oleh ferrit dengan ukuran butir yang lebih kasar dan koloni perlit yang lebih jarang. Fenomena ini sejalan dengan teori transformasi difusional, di mana pendinginan lambat pada baja karbon rendah mendorong terbentuknya fasa ferrit dominan dengan perlit dalam fraksi yang lebih kecil.

Tidak ditemukannya struktur martensit pada seluruh variasi arus

pengelasan dapat dijelaskan berdasarkan teori transformasi non-difusional, yang mensyaratkan laju pendinginan sangat cepat serta kandungan karbon yang cukup tinggi. Pada baja SS400 dengan kadar karbon rendah, meskipun dilakukan pengelasan pada ketebalan pelat 6 mm dan arus tinggi, laju pendinginan yang terjadi masih berada dalam wilayah pembentukan fasa ekuilibrium ferrit–perlit. Dengan demikian, variasi arus pengelasan pada baja SS400 terutama memengaruhi ukuran butir dan proporsi ferrit–perlit, tanpa memicu pembentukan martensit.

4. Kesimpulan

Hasil uji kekerasan menunjukkan bahwa nilai kekerasan dipengaruhi oleh arus pengelasan dan ketebalan pelat. Pada arus kecil (110 A) kekerasan lebih tinggi karena pendinginan cepat, sedangkan arus besar (130 A) menurunkan kekerasan pada pelat tebal akibat pendinginan lambat. Uji tarik memperlihatkan sifat mekanik sambungan baja SS400 sangat bergantung pada kombinasi arus dan ketebalan. Yield strength dan tensile strength menurun seiring bertambahnya ketebalan maupun arus karena peningkatan masukan panas, sementara elongasi bervariasi: arus tinggi optimal untuk pelat tipis dan tebal, arus rendah lebih baik pada pelat sedang. Struktur mikro baja SS400 hasil GTAW juga dipengaruhi arus dan ketebalan. Pada pelat tipis 1,2 mm didominasi ferrit dan perlit, dengan butir ferrit makin besar pada arus tinggi. Pada pelat 5 mm muncul martensit pada arus 120 A dan lebih dominan di 130 A karena pendinginan cepat. Sedangkan pada pelat 6 mm hanya ferrit dan perlit yang terbentuk dengan butir ferrit lebih kasar pada arus besar. Hal ini menunjukkan pembentukan martensit dipengaruhi ketebalan pelat dan laju pendinginan, dengan ketebalan sedang (5 mm) paling memungkinkan terbentuk martensit.

Ucapan terimakasih

Penelitian ini didanai sepenuhnya dari Hibah Penelitian Dosen Pemula dari Direktorat Jenderal Riset dan Pengembangan, Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains dan Teknologi dengan nomor kontrak 125/C3/DT.05.00/PL/2025 tanggal 28 Mei 2025 dan kontrak turunan LLDIKTI Wilayah IV dengan nomor kontrak 33.145/A.I/UNISMU/VI/2025 tanggal 10 Juni 2025. Penulis mengucapkan terima kasih atas kesempatan yang telah diberikan melalui skema hibah tersebut.

Referensi

- [1] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufacturing Engineering and Technology*, 7th ed. Pearson Education, Inc, 2014.
- [2] S. Suryadi, S. Hadi, and A. Purnomo, “Pengaruh Arus Listrik Terhadap Kualitas Las pada Proses TIG Welding Baja SS400,” *J. Teknol. dan Sist. Inf.*, vol. 1, no. 2, pp. 40–47, 2020.
- [3] H. B. Cary and S. C. Helzer, *Modern Welding Technology*, 6th ed. Pearson Education, Inc, 2005.
- [4] A. Kumar and R. S. Parmar, “Effect of Welding Parameters on Mechanical Properties and Microstructure of GTAW Joints.,” *Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 3, no. 1, pp. 196–200, 2013.
- [5] D. R. Prajapati, V. J. Patel, and K. M. Patel, “Parametric Optimization of TIG Welding for SS304 using Taguchi Method,” *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 739–745, 2018.
- [6] M. Ibrahim and M. Ramli, “Effect of Welding Current on the Mechanical Properties of Mild Steel Welded by GTAW,” *J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 11, no. 4, pp. 3047–3056, 2017.
- [7] T. Gunarso, “Pengaruh Parameter Pengelasan TIG Terhadap Ketangguhan Las Baja Lunak,” *J. Teknol. Mesin*, vol. 10, no. 1, pp. 25–

- 30, 2019.
- [8] M. Imam *et al.*, “Experimental study on improving the additively manufactured GMAW and TIG beads using FSP,” *Mater. Today Proc.*, vol. 56, pp. 690–705, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.154>.
- [9] A. Ramakrishnan, T. Rameshkumar, G. Rajamurugan, G. Sundararaju, and D. Selvamuthukumar, “Experimental investigation on mechanical properties of TIG welded dissimilar AISI 304 and AISI 316 stainless steel using 308 filler rod,” *Mater. Today Proc.*, vol. 45, pp. 8207–8211, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.502>.
- [10] S. Mitra, A. Kumar, and M. Velu, “Characterization of Gas Tungsten Arc welded dissimilar joint of AISI2205 and EN10025,” *Mater. Today Proc.*, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.691>.
- [11] K. Ito, T. Okuda, R. Ueji, H. Fujii, and C. Shiga, “Increase of bending fatigue resistance for tungsten inert gas welded SS400 steel plates using friction stir processing,” *Mater. Des.*, vol. 61, pp. 275–280, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.076>.
- [12] N. Jahanzeb, J.-H. Shin, J. Singh, Y.-U. Heo, and S.-H. Choi, “Effect of microstructure on the hardness heterogeneity of dissimilar metal joints between 316L stainless steel and SS400 steel,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 700, pp. 338–350, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.06.002>.
- [13] F. Khan, T. Miura, Y. Morisada, K. Ushioda, and H. Fujii, “Dissimilar joining of A7075 aluminum and SS400 steel utilizing center-driven double-sided linear friction welding using mild steel as a center material: Processing, mechanical and microstructure characterization,” *J. Manuf. Process.*, vol. 139, pp. 67–80, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.02.017>.
- [14] M. Wang, G. Zhang, B. Hou, and W. Wang, “Deep learning coupled Bayesian inference method for measuring the elastoplastic properties of SS400 steel welds by nanoindentation experiment,” *Measurement*, vol. 242, p. 116092, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116092>.