

Contents list available at [Sinta](https://sinta)

A R M A T U R

: Artikel Teknik Mesin & Manufaktur

Journal homepage: <https://scholar.unmetro.ac.id/index.php/armatur>

Pengaruh Variasi Arus Pengelasan SMAW Pada Baja ST 42 Dengan Elektroda E7018 Terhadap Kekuatan Bending dan Struktur Mikro

Ahmad Raffi^{1*}, Deri Teguh Santoso², Suparya³, Ayattullah Ali
Khamanie⁴Ujiburrahman⁵

^{1,2}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, Jl. HS. Ronggo Waluyo, Teluk Jambe Timur, Karawang, Indonesia

A R T I C L E I N F O

Keywords:
Welding Current, ST 42 Steel,
E7018 Electrode, Mechanical
Properties, SMAW.

A B S T R A C T

This research aims to analyze the effect of variations in Shielded Metal Arc Welding (SMAW) current on the mechanical properties of ST 42 low carbon steel using the E7018 electrode. Three current levels were applied 80A, 100A, and 120A with three bending test objects and one microstructure test object for each current. The experimental method uses bending tests according to ASTM E290 standards and microstructural observations with 100× magnification to determine phase changes. Flexural tests show average strengths of 675.44 MPa (80 A), 454.64 MPa (100 A), and 591.15 MPa (120 A). Microstructural analysis shows that the weld metal (WM), heat affected zone (HAZ), and base metal (BM) areas are dominated by the ferrite phase with the presence of pearlite, thus affecting the toughness of the material. Varying welding current significantly influences flexural strength and microstructural changes, with 80 A providing the highest flexural strength, while 100 A produces more stable overall mechanical properties.

Pendahuluan

Perkembangan teknologi di bidang konstruksi dan manufaktur menuntut sambungan logam yang kuat dan andal. Salah satu teknik penyambungan logam yang paling banyak digunakan adalah *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW), karena peralatannya sederhana, biaya relatif

rendah, dan dapat diterapkan pada berbagai posisi pengelasan [1]. Proses pengelasan SMAW merupakan bagian integral dari proses manufaktur. Proses pengelasan merupakan salah satu teknologi penyambungan logam dengan atau tanpa tekanan dan dengan atau tanpa logam. Meskipun didefinisikan menurut Industri

*Corresponding author: 2110631150005@student.unsika.ac.id

DOI: <https://10.24127/armatur.v6i2.9196>

Received 10 Juni 2025; Received in revised form 10 Agustus 2025; Accepted 28 september 2025

Available online 30 September 2025

Jerman dan Norman (DIN), pengelasan adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau paduan logam dalam keadaan cair [2]. Pengelasan juga dapat didefinisikan adalah suatu teknik penyambungan logam dengan cara meleburkan sebagian logam induknya dan mengelasnya menggunakan kawat las dengan atau tanpa tekanan sehingga menghasilkan sambungan yang menerus [3].

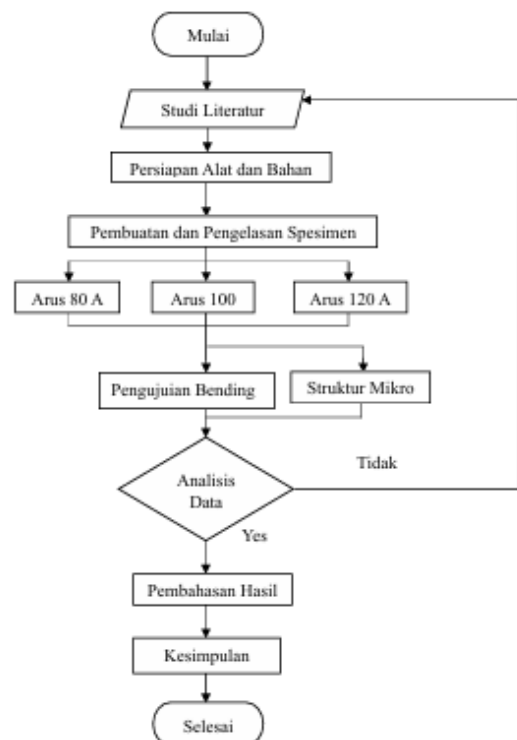
Dalam pengelasan ada beberapa faktor yang mempengaruhi hasil pengelesan, kualitas hasil las tidak hanya ditentukan oleh jenis material dan elektroda, tetapi juga oleh parameter pengelasan, terutama arus listrik [4]. Arus pengelasan memengaruhi jumlah panas yang masuk ke logam dasar, laju pencairan elektroda, serta kecepatan pendinginan logam las. Jika arus terlalu rendah, pencairan logam tidak stabil dan penetrasi las menjadi kurang sempurna. Sebaliknya, jika arus terlalu tinggi, panas berlebih dapat menyebabkan cacat las, distorsi, atau perubahan struktur mikro yang menurunkan kekuatan mekanik sambungan. Jenis arus mencakup arus tinggi dan arus rendah, pemakaian arus wajib memperhatikan nilai kekuatan dan ketahanan [5].

Arus pengelasan yang besar akan menyebabkan cepatnya logam mencair yang menghasilkan butiran percikan kecil. Jika kuat arus semakin kecil maka pencairan logam pada bagian ujung elektroda dari busur listrik menjadi tidak beraturan karena kecepatan pematatan yang lama [6]. Kuat arus pada waktu pengelasan berpengaruh terhadap kekuatan benda hasil lasan untuk menerima beban yang diterimanya [7]. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa variasi arus dapat memengaruhi kekuatan tarik, kekuatan bending, dan ketangguhan lasan baja karbon. Namun, hasil yang diperoleh sering tidak konsisten karena perbedaan metode uji, material, atau kondisi pengelasan. Oleh sebab itu, penelitian ini perlu dilakukan untuk mengetahui arus pengelasan optimal pada baja ST 42 dengan elektroda E7018,

sehingga dihasilkan sambungan las dengan sifat mekanik yang baik dan stabil.

Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini yaitu menggunakan metode eksperimen, kemudian pada penelitian ini menggunakan tiga sampel pada setiap arus untuk uji bending dan satu spesimen untuk setiap arus pada pengujian mikro struktur. Proses penelitian ini tertuang pada diagram alir pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Sumber: Pribadi

Proses penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan utama yaitu, studi literatur, persiapan alat dan bahan, pembuatan dan pengelasan spesimen dengan variasi arus yang telah ditentukan, setelah jadi sampel kemudian dilakukan pengujian bending dan mikro struktur, analisis data setelah analisis data dilakukan pembahasan dan didapatkan kesimpulan.

Variabel Penelitian

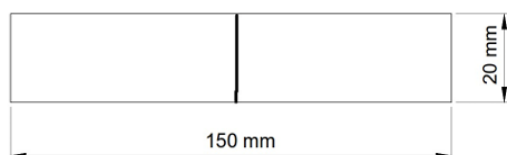
Variabel penelitian adalah suatu atribut atau sifat atau nilai dari orang, atau obyek atau kegiatan yang mempunyai

variasi tertentu yang ditetapkan oleh peneliti untuk dipelajari dan kemudian ditarik kesimpulannya.

1. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah kuat arus pengelasan las SMAW (80 A, 100 A, 120 A).
2. Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah mesin las, operator las, jenis kampuh las, jenis elektroda, dan pelat baja ST 42.
3. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah nilai bending dan struktur mikro hasil pengelasan.

Spesimen Uji Bending dibentuk sesuai standar ASTM E290, pengujian bending dilakukan menggunakan *Computerized Servo Hydraulic Universal Testing Machine* tipe VTS, WAW-300E dengan kapasitas maksimum 300 kN. etiap variasi arus pengelasan diuji dengan tiga spesimen untuk memastikan keakuratan dan konsistensi data. Kecepatan pembebanan disesuaikan agar sesuai dengan standar dan mencegah hasil pengujian yang bias akibat deformasi dinamis.

Standar ASTM E566 mengatur tentang analisis fasa dalam uji metalografi. Ukuran spesimen untuk pengujian struktur mikro biasanya disesuaikan dengan kebutuhan analisis dan jenis material yang diuji. Namun secara umum spesimen untuk uji struktur mikro memiliki ukuran yang cukup kecil agar dapat dipasang pada mikroskop. Gambar 2 menunjukkan spesifikasi sampel dimensi uji bending yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 2. Dimensi spesimen uji bending ASTM E290
Sumber: Pribadi

Hasil dan Pembahasan

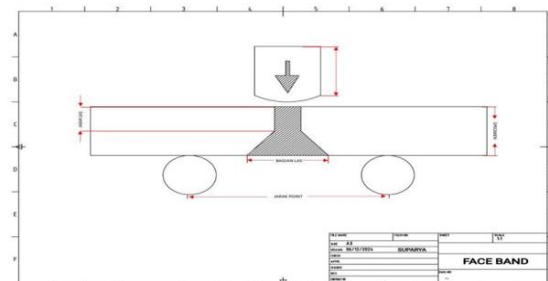
Berdasarkan hasil pengelasan yang telah dilakukan pada baja ST 42 dengan variasi arus 80A, 100A, 120A didapat hasil pengelasan yang dilihat pada Gambar 3.



(a) (b) (c)
Gambar 3. Hasil pengelasan 80A (a), 100A (b), 120A (c)
Sumber: Pribadi

Uji Bending

Setelah dilakukan proses pengelasan kemudian spesimen akan dilakukan pengujian yang dilakukan dengan skema uji *three point bending* pada penelitian ini yaitu uji bending *face bend*. Gambar 4 menampilkan skema pengujian yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 4. Skema uji bending
Sumber: Pribadi

Dari skema pengujian dan dilakukan uji bending didapat bentuk dan hasil pengujian pada penelitian ini. Gambar 5 merupakan bentuk akhir dari spesimen yang telah di uji bending.



(a) (b)



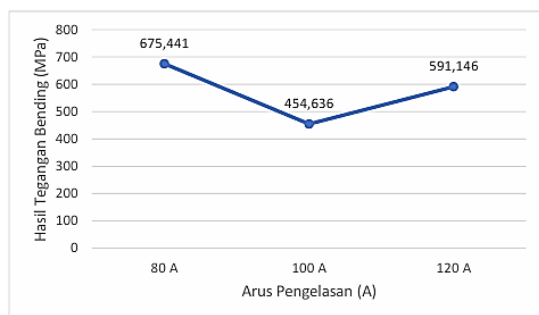
(c)

Gambar 5. Hasil pengujian bending 80A (a), 100A (b), 120A (c)

Tabel 1. Hasil pengujian bending
Sumber: Pribadi

| No | Spesimen | F (P) | F (P) | L | T (d) | W (b) | Tegangan | Rata-rata tegangan |
|----|----------|-------|-------|----|-------|-------|----------|--------------------|
| | | (kN) | (N) | | | | | |
| 1 | 80.1 | 1.67 | 1670 | 76 | 19.81 | 4.83 | 411.948 | 675.441 |
| 2 | 80.2 | 0.63 | 630 | 76 | 19.72 | 4.76 | 160.740 | |
| 3 | 80.3 | 1.26 | 1260 | 76 | 19.25 | 4.92 | 308.258 | |
| 4 | 100.1 | 0.63 | 630 | 76 | 20.97 | 4.78 | 149.896 | 454.636 |
| 5 | 100.2 | 0.94 | 940 | 76 | 18.13 | 4.83 | 253.361 | |
| 6 | 100.3 | 0.61 | 610 | 76 | 19.18 | 4.85 | 154.135 | |
| 7 | 120.1 | 0.75 | 750 | 76 | 21.95 | 4.73 | 174.104 | 591.146 |
| 8 | 120.2 | 1.18 | 1180 | 76 | 20.72 | 4.79 | 282.960 | |
| 9 | 120.3 | 1.8 | 1800 | 76 | 22.61 | 4.75 | 402.244 | |

Pada setiap variasi arus yang digunakan pada penelitian ini menggunakan tiga sampel untuk mencari keakuratan nilai dan nilai tengah dari hasil pengujian setiap arus. Tabel 4.1 diatas menunjukkan terdapat perubahan kekuatan bending untuk masing-masing kuat arus yang divariasikan pada pengelasan SMAW baja ST 42. Terlihat pada Tabel 4.1 pada arus 80 A memiliki nilai kekuatan bending tertinggi hasil pengelasan dengan nilai kekuatan bending rata-rata 675,441 MPa, pada arus 100 A memiliki nilai bending paling kecil sebesar 454,636 MPa dan pada arus 120 A dengan nilai kekuatan bending rata-rata 591,146 MPa. Pada tabel 4.1 adalah tabel hasil pengujian bending. Pada Gambar 6 merupakan diagram hasil pengujian bending.



Gambar 6. Grafik tegangan bending terhadap variasi arus

Sumber: Pribadi

Jika dilihat dari Gambar 6 di dapatkan hasil pada kuat arus 80 A mempunyai tegangan bending lebih besar dibandingkan dengan kuat arus 100 A dan kuat arus 120 A. Pada penelitian ini kuat arus pengelasan sangat mempengaruhi pada hasil kekuatan bending karena pada kuat arus 100 A dan kuat arus 120 A memungkinkan arus terlalu tinggi. Sedangkan pada kuat arus 80 A memungkinkan kuat arus yang ideal karena mempunyai hasil kekuatan bending yang tinggi dibandingkan dengan kekuatan arus 100 A dan kekuatan arus 120 A. Pada penelitian (Azwinur, dkk, 2017) arus pengelasan yang lebih tinggi cenderung menghasilkan panas yang lebih besar sehingga dapat mempengaruhi sifat mekanis seperti kekuatan bending, arus yang lebih terlalu tinggi bisa menyebabkan penurunan kualitas pengelasan[8] .

Perbedaan ini dapat dijelaskan dari sudut pandang struktur mikro. Pada arus yang lebih tinggi (100 A dan 120 A), panas masukan (*heat input*) yang lebih besar menyebabkan pertumbuhan butir *ferrite* menjadi lebih kasar. Pertumbuhan butir yang lebih kasar akan menurunkan kekuatan bending karena material menjadi lebih lunak dan ulet tetapi kehilangan ketangguhan optimal. Sebaliknya, pada arus 80 A, pertumbuhan butir relatif lebih halus sehingga menghasilkan kombinasi yang lebih baik antara fasa *ferrite* dan *pearlite*, yang meningkatkan kekuatan bending sambungan las.

Penelitian (Bambang, 2025) menyebutkan ada beberapa faktor yang membuat perbedaan kekuatan bending yaitu sebagai berikut:

1. *Human error*, kemungkinan bisa terjadi karena *welder* yang bersangkutan mengalami kelelahan, posisi pengelasan yang salah, atau gangguan di area pengelasan.

2. Kecepatan pengelasan, untuk menghitung kecepatan pengelasan digunakan rumus sebagai berikut:

$$V = \frac{L}{t}$$

Dimana:

V= adalah kecepatan pengelasan (dalam satuan panjang per waktu) menit

L= adalah panjang las yang dibuat dalam satuan panjang (mm)

t= adalah waktu yang dibutuhkan untuk membuat las tersebut (detik/menit).

$$V = \frac{80\text{mm}}{39\text{ s}} = 2,0\text{mm/s}$$

$$V = \frac{80\text{mm}}{32\text{ s}} = 2,5\text{mm/s}$$

$$V = \frac{80\text{mm}}{25\text{ s}} = 3,2\text{mm/s}$$

Seperti dilihat rumus di atas untuk kecepatan pengelasan dengan arus 120 memiliki nilai kecepatan 2,0 mm/s, 100 memiliki nilai kecepatan las 2,5 mm/s, untuk arus 80 memiliki kecepatan pengelasan 3,22 mm/s. Untuk arus 100 dan 120 terlalu cepat dalam pengelasan nya karena itu dapat menyebabkan hasil uji bending naik turun. Jika kecepatan las terlalu cepat, panas yang diterapkan pada material selama pengelasan akan lebih sedikit, sehingga fusi antara logam pengisi dan logam dasar tidak maksimal. Hal ini bisa menyebabkan cacat pada pengelasan, seperti retak atau porositas, yang berakibat pada penurunan kekuatan bending [9].

Uji Mikro Struktur

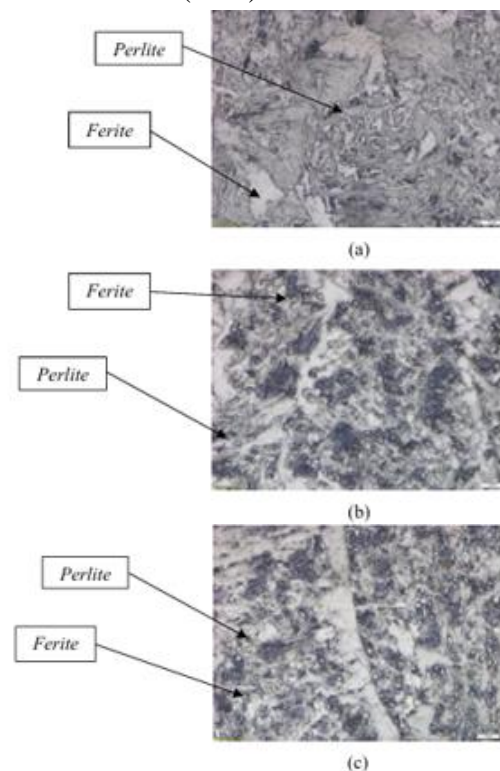
Proses pengamatan struktur mikro pada spesimen hasil pengelasan SMAW menggunakan baja ST42 dengan variasi arus, menggunakan mesin mikroskop dengan perbesaran 100x. Untuk pengambilan dan pengamatan gambar struktur mikro pada sampel uji ini ada 3

(tiga) daerah, yaitu *Weld metal* (WM), *Heat affected zone* (HAZ) dan *Base metal* (BM). Gambar 7 merupakan spesimen untuk pengujian struktur mikro.



Gambar 7. Spesimen uji struktur mikro
Sumber: Pribadi

1. *Weld metal* (WM)



Gambar 8. Hasil pengamatan struktur mikro pengelasan baja ST42 pada area WM
(a) pembesaran 100x WM 80 A
(b) pembesaran 100x WM 100 A
(c) pembesaran 100x WM 120 A.

Sumber: Pribadi

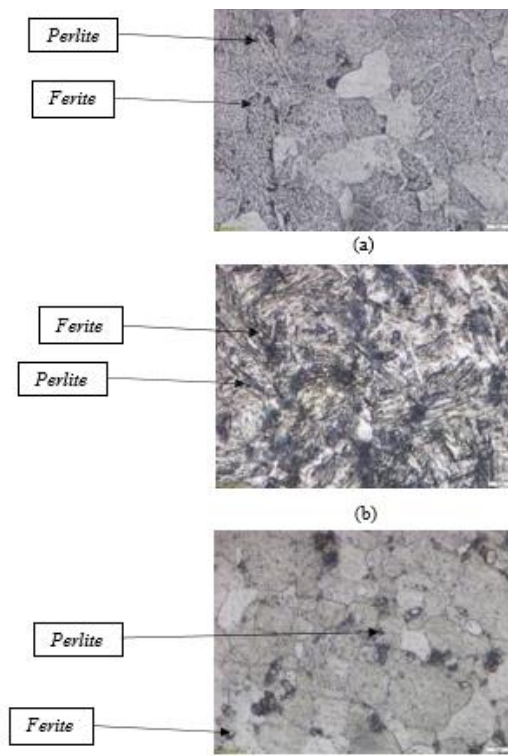
Berdasarkan Gambar 8 menunjukkan hasil pengamatan struktur mikro pengelasan baja ST 42 dengan pembesaran 100x pada daerah *weld metal* menunjukkan struktur mikro terlihat fasa yang terbentuk adalah fasa *perlite*, *ferrite* dan. Namun lebih didominasi oleh fasa ferrite. Pada daerah *weld metal* terjadi reaksi eutektoid yang mana terjadi reaksi padatan *solid-state* yang artinya fasa padat bertransformasi menjadi

dua fasa padat lainya. Pada reaksi ini terbentuk fasa *ferite*, *perlite*.

Pada daerah *weld metal* dari ketiga media ini fasa *ferrite* dan *perlite* ialah fasa yang paling banyak terlihat. Terbentuknya struktur *ferite* yang banyak pada struktur mikro menandakan jumlah kandungan Cr yang banyak, semakin banyak kandungan Cr maka semakin banyak pula fasa *ferite* yang terbentuk di dalamnya. Fasa *ferite* sendiri mempunyai sifat lunak dan ulet dan konduktivitas thermal yang tinggi serta mempunyai struktur kristal BCC (*Body Centered Cubic*) dengan temperatur austenite 723°C[10].

2. Heat Affected Zone (HAZ)

Daerah pengaruh panas atau juga disebut dengan *heat effected zone* (HAZ), merupakan logam dasar yang berada bersebelahan dengan logam inti yang selama proses pengelasan mengalami siklus termal pemanasan dan mengalami pendinginan cepat.



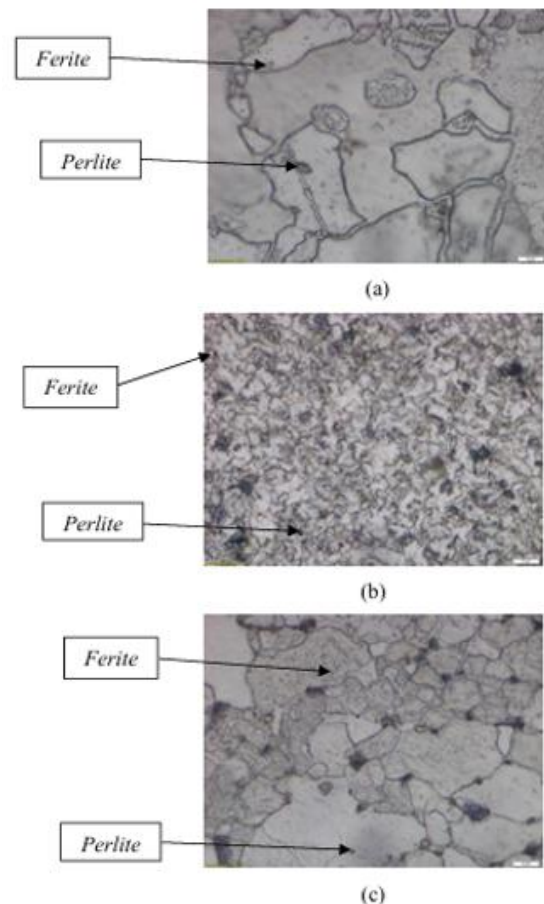
Gambar 9. Hasil pengamatan struktur mikro pengelasan baja ST42 pada area HAZ (a) pembesaran 100x HAZ 80A (b) pembesaran 100x HAZ 100A (c) pembesaran 100x HAZ 120A.

Sumber: Pribadi

Berdasarkan Gambar 9 menunjukkan hasil pengamatan struktur mikro pengelasan baja ST 42 dengan pembesaran 100x pada daerah HAZ menunjukkan struktur mikro terlihat fasa yang terbentuk adalah fasa *perlite* dan *ferrite*. namun lebih didominasi oleh fasa *ferrite*. Pada daerah terpengaruh paparan panas atau *heat affected zone* yaitu daerah berdekatan dengan logam yang mencair menghasilkan dua fasa yang terbentuk setelah proses pengelasan dilakukan yaitu fasa *ferrite* dan *perlite*.

3. Base Metal (BM)

Base metal merupakan bagian logam pengelasan yang tidak terkena elektroda las namun masih mendapatkan panas dari proses pengelasan yang dilakukan.



Gambar 10. Hasil pengamatan struktur mikro pengelasan baja ST42 pada area BM (a) pembesaran 100x BM 80A (b) pembesaran 100x BM 100A (c) pembesaran 100x BM 120A.

Sumber: Pribadi

Berdasarkan Gambar 10 menunjukkan hasil pengamatan struktur mikro pengelasan baja ST 42 dengan pembesaran 100x pada daerah BM menunjukkan struktur mikro terlihat fasa yang terbentuk adalah fasa *perlite* dan *ferrite*. namun lebih didominasi oleh fasa *ferrite*.

Pada daerah *base metal* ialah daerah logam yang mempunyai jarak yang cukup jauh dengan area terjadinya proses pengelasan namun masih terkena dampak panas yang ditimbulkan. Pada daerah ini fasa yang terbentuk hanya fasa *ferrite* dan fasa *perlite*, fasa *cementite* sudah tidak terlihat dikarenakan jauhnya cakupan area logam ini dengan pengelasan [11].

Hasil pengamatan struktur mikro mendukung hasil uji bending. Pada arus 80 A, fasa *ferrite* yang terbentuk cenderung lebih halus dan merata dengan distribusi *pearlite* yang baik, sehingga mampu meningkatkan ketangguhan material dan memberikan kekuatan bending yang lebih tinggi. Sebaliknya, pada arus 100 A dan 120 A, peningkatan panas masukan mengakibatkan pertumbuhan butir *ferrite* lebih kasar dan jumlah *pearlite* berkurang, sehingga kekuatan bending menurun. Hal ini menunjukkan adanya keterkaitan yang kuat antara hasil uji mikrostruktur dengan hasil uji bending, di mana semakin halus butir *ferrite* dan semakin merata distribusi *pearlite*, maka semakin tinggi pula kekuatan bending yang diperoleh.

Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi arus pengelasan SMAW berpengaruh signifikan terhadap kekuatan bending dan struktur mikro baja ST 42 dengan elektroda E7018. Arus 80 A menghasilkan kekuatan bending tertinggi sebesar 675,441 MPa karena panas masukan lebih terkendali sehingga butir *ferrite* lebih halus dan distribusi *pearlite* lebih merata. Sebaliknya, pada arus 100 A kekuatan bending menurun hingga 454,636 MPa akibat pertumbuhan butir *ferrite* yang lebih kasar dan berkurangnya *pearlite*, sementara

pada arus 120 A kekuatan bending mencapai 591,146 MPa, lebih tinggi dari 100 A namun masih lebih rendah dibandingkan 80 A karena panas berlebih membuat struktur mikro kurang stabil.

Secara mikrostruktur, pada zona *Weld Metal* (WM) dominasi fasa *ferrite* dan *pearlite* terlihat lebih halus pada arus 80 A, sedangkan pada arus lebih tinggi (100 A dan 120 A) *ferrite* tumbuh lebih kasar sehingga menurunkan kekuatan mekanik. Pada zona *Heat Affected Zone* (HAZ), arus 80 A menghasilkan butir lebih halus dengan sifat mekanik lebih baik, sementara pada arus tinggi, panas berlebih memperbesar butir *ferrite* sehingga mengurangi ketangguhan material. Sementara itu, pada zona *Base Metal* (BM) yang berada jauh dari inti las, struktur mikro relatif stabil dengan dominasi *ferrite* dan *pearlite*, meskipun tetap berkontribusi pada kekuatan bending melalui distribusi *pearlite*.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa semakin halus butir *ferrite* dan semakin merata distribusi *pearlite* maka semakin tinggi pula kekuatan bending yang diperoleh. Hasil uji bending dan pengamatan mikrostruktur saling mendukung, di mana arus rendah (80 A) terbukti menghasilkan kombinasi struktur mikro terbaik sekaligus memberikan kekuatan bending tertinggi.

Daftar Pustaka

- [1] A. Gilang, W. Pratama, dan A. Astm, "The effect of variation in E7018 electrode current on the bending strength of carbon steel material Pengaruh variasi arus elektroda E7018 terhadap kekuatan bending material baja karbon," vol. 1, no. 1, hal. 15–19, 2024.
- [2] P. K. Baghel, "Effect of SMAW process parameters on similar and dissimilar metal welds: An overview," *Heliyon*, vol. 8, no. 12, hal. e12161, 2022, doi:

- 10.1016/j.heliyon.2022.e12161.
- [3] Q. Ismael, "Investigation of mechanical properties of low carbon steel weldments for different welding processes," *SVU-International J. Eng. Sci. Appl.*, vol. 3, no. 2, hal. 116–122, 2022, doi: 10.21608/svusrc.2022.152920.1061.
- [4] J. Jasman, I. Irzal, J. Adri, dan P. Pebrian, "Effect of Strong Welding Flow on the Violence of Low Carbon Steel Results of SMAW Welding with Electrodes 7018," *Teknomekanik*, vol. 1, no. 1, hal. 24–31, 2018, doi: 10.24036/tm.v1i1.972.
- [5] I. R. Fariski dan A. Fathier, "ANALISA VARIASI ARUS PENGELASAN SMAW TERHADAP SIFAT MEKANIK DENGAN MENGGUNAKAN MATERIAL BAJA ST 42 POSISI PENGELASAN 3G Pengaruh Parameter Pengelasan Untuk mendapatkan hasil dari sebuah proses pengelasan yang baik , hal yang perlu diperhatikan sebelum mel," vol. 8, no. 1, 2024.
- [6] M. Chaturvedi *et al.*, "Welding of Low Carbon Steel Tubes Using Magnetically Impelled Arc Butt Welding: Experimental Investigation and Characterization," *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 11, 2022, doi: 10.3390/met12111965.
- [7] N. A. Mohd-Lair, Y. Yuyut, Z. Ahmad, dan A. M. Tahir, "SMAW: The Effects of Currents and Welding Rod Diameters on Welded Joint Ultimate Tensile Strength Using the Full Factorial DOE," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2129, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2129/1/012071.
- [8] A. Azwinur, S. A. Jalil, dan A. Husna, "Pengaruh variasi arus pengelasan terhadap sifat mekanik pada proses pengelasan SMAW," *J. POLIMESIN*, vol. 15, no. 2, hal. 36, 2017, doi: 10.30811/jpl.v15i2.372.
- [9] B. Herlambang, "Jurnal Inovasi Ilmu Pengetahuan dan Teknologi," *Akrab Juara*, vol. 5, no. 1, hal. 43–54, 2025.
- [10] T. Okviyanto, D. Setiawan, G. Nugraha, dan D. Muliastri, "Analisis Struktur Mikro Terhadap Hasil Eksperimental Sambungan Las SMAW Pada Baja Karbon ST-37," *Mach. J. Teknol. Terap.*, vol. 4, no. 2, hal. 82–90, 2023, [Daring]. Tersedia pada: <https://jurnal.polsri.ac.id/index.php/machinery/article/view/6806>
- [11] B. Yang *et al.*, "Evolution of the Heterogeneous Microstructure of a 12Cr1MoV Welded Joint after Post-Weld Heat Treatment and Its Effect on Mechanical Properties," *Metals (Basel)*, vol. 13, no. 12, 2023, doi: 10.3390/met13121998.