

Simulasi FEM dan Validasi Struktur Mikro terhadap Pengaruh Kecepatan Pengelasan SMAW pada ASTM A36

Y.A. Maureta^{1,*}, A. Windyandari¹

¹Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan, Fakultas Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia.

ABSTRAK – Pengelasan merupakan salah satu proses penyambungan logam yang umum digunakan dalam industri perkapalan, namun proses ini berpotensi menimbulkan tegangan sisa dan distorsi akibat distribusi panas yang tidak merata. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kecepatan pengelasan terhadap tegangan sisa dan distorsi pada sambungan butt joint pelat ASTM A36 dengan metode pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*). Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah simulasi numerik berbasis Finite Element Method (FEM) menggunakan perangkat lunak ANSYS 2024 R2, dengan variasi kecepatan pengelasan 15 cm/menit, 20 cm/menit, dan 25 cm/menit. Validasi dilakukan melalui uji struktur mikro pada spesimen hasil pengelasan menggunakan mikroskop metalografi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan pengelasan, maka nilai tegangan sisa dan distorsi semakin rendah. Kecepatan 25 cm/menit memberikan hasil terbaik dengan tegangan sisa sebesar 160,29 MPa dan distorsi 0,1436 mm. Hasil uji mikrostruktur pada daerah las dan HAZ menunjukkan butiran halus dan merata, mendukung hasil simulasi bahwa kecepatan pengelasan tinggi menghasilkan input panas lebih rendah dan struktur mikro lebih stabil. Dengan demikian, kecepatan pengelasan 25 cm/menit direkomendasikan sebagai parameter optimal dalam meminimalkan tegangan sisa dan distorsi pada pelat ASTM A36.

Kata kunci: SMAW, kecepatan pengelasan, tegangan sisa, distorsi, FEM

ABSTRACT – Welding is one of the metal joining processes commonly used in the shipping industry, but this process has the potential to cause residual stress and distortion due to uneven heat distribution. This study aims to analyze the effect of welding speed variations on residual stress and distortion in ASTM A36 plate butt joints using the SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) welding method. The method used in this study is a numerical simulation based on the Finite Element Method (FEM) using ANSYS 2024 R2 software, with welding speed variations of 15 cm/min, 20 cm/min, and 25 cm/min. Validation was carried out through microstructure tests on welding specimens using a metallographic microscope. The simulation results show that the higher the welding speed, the lower the residual stress and distortion values. A speed of 25 cm/min gives the best results with a residual stress of 160,29 MPa and a distortion of 0,1436 mm. The results of the microstructure test in the weld area and HAZ show fine and even grains, supporting the simulation results that high welding speeds produce lower heat input and more stable microstructures. Thus, a welding speed of 25 cm/min is recommended as the optimal parameter in minimizing residual stress and distortion in ASTM A36 plates.

Keyword: SMAW, welding speed, residual stress, distortion, FEM

Dikirim: 27 Mei 2025; Diterima: 22 Agustus 2025

PENDAHULUAN

Pengelasan merupakan salah satu proses manufaktur yang krusial dalam industri perkapalan dan konstruksi logam, karena memungkinkan penyambungan permanen antara dua atau lebih komponen logam.

Namun, proses ini sering menimbulkan masalah teknis berupa tegangan sisa dan distorsi, yang muncul akibat distribusi panas yang tidak merata selama proses pemanasan dan pendinginan logam las [1]. Tegangan sisa dapat menurunkan kekuatan struktural sambungan, sementara distorsi berpotensi mengubah bentuk geometri komponen dan memengaruhi ketepatan dimensi sambungan las [2].

Salah satu parameter penting yang berpengaruh terhadap besarnya tegangan sisa dan distorsi adalah kecepatan pengelasan. Kecepatan yang terlalu rendah menyebabkan waktu pemanasan lebih lama, meningkatkan input panas dan memperluas zona terpengaruh panas daerah *Heat Affected Zone* (HAZ), sehingga memperbesar risiko distorsi [3]. Sebaliknya, kecepatan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan penetrasi las tidak sempurna dan pembentukan struktur mikro yang tidak seragam. Oleh karena itu, penentuan kecepatan pengelasan yang optimal menjadi faktor penting dalam menjaga kualitas sambungan las [4].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kecepatan pengelasan SMAW terhadap tegangan sisa dan distorsi pada sambungan butt joint pelat ASTM A36, menggunakan pendekatan numerik menggunakan *Finite Element Method* (FEM) dan validasi eksperimental melalui uji struktur mikro. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat memberikan rekomendasi parameter pengelasan yang tepat untuk meminimalkan distorsi dan meningkatkan kekuatan struktural sambungan las.

TEORI SIMULASI

Simulasi numerik menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM) dilakukan untuk menganalisis distribusi temperatur, tegangan sisa, dan distorsi pada pelat ASTM A36 yang dilas menggunakan proses SMAW. Analisis dibagi menjadi dua tahap, yaitu analisis termal dan analisis struktural. Analisis termal bertujuan memperoleh distribusi temperatur akibat *heat input* proses pengelasan, sedangkan analisis struktural bertujuan menghitung distorsi dan tegangan sisa akibat efek termal tersebut. Perhitungan input panas digunakan untuk menentukan besarnya energi yang diterima material selama proses pengelasan. Rumus heat input sebagai berikut:

Persamaan 1 menunjukkan bahwa besarnya heat input dipengaruhi oleh efisiensi proses pengelasan (η), tegangan (V), arus (I), dan kecepatan pengelasan (v).

$$HI = \eta \cdot \frac{\text{Tegangan las } (V) \times \text{Arus las } (I)}{v \text{ (in/ min or mm/min)}} \quad (1)$$

Keterangan :

HI = Heat Input (kJ/mm)

η = Koefisien Efisien Pengelasan

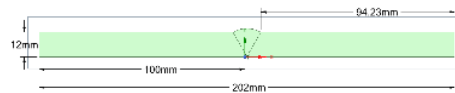
V = Voltase (V)

I = Arus Busur (A)

v = Kecepatan Las (mm/min)

METODE

Proses pembuatan model geometri pelat desain 3D dengan *SpaceClaim* dengan dimensi 200 mm × 200 mm × 12 mm dapat dilihat pada **gambar 1** dan disusun dalam sambungan *butt joint*. Material yang digunakan adalah ASTM A36.



Gambar 1. Model Spesimen

Gambar 2 menunjukkan analisis termal tersebut digabungkan dengan analisis struktur. *Imported Load* digunakan untuk mengimpor perpindahan suhu yang dilakukan pada saat analisis termal ke analisis struktural yang mana seperti diketahui beban yang digunakan adalah beban temperatur.

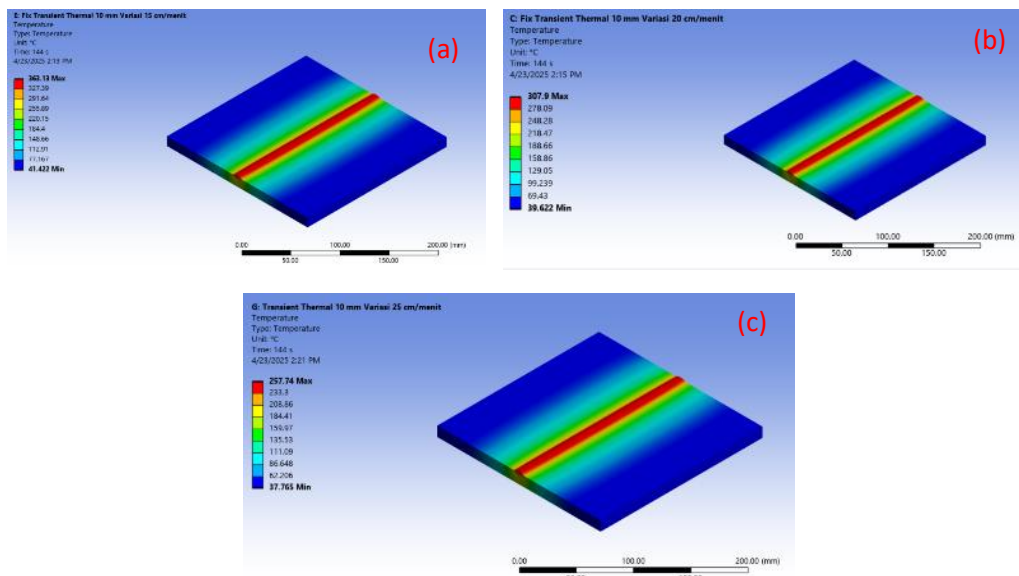


Gambar 2. Linked Analysis

HASIL EKSPERIMEN

Analisa Termal

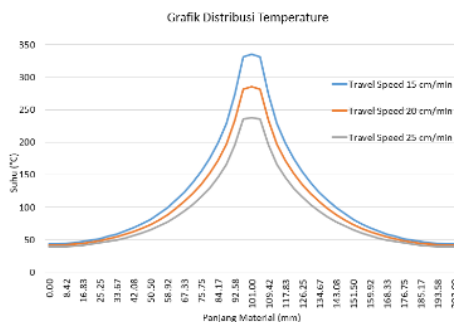
Setelah simulasi pengelasan dilakukan, akan digambarkan distribusi termal beserta parameter pengelasan yang digunakan. Hasil distribusi termal selama pengelasan dapat dilihat pada **Gambar 3(a)** menunjukkan kecepatan pengelasan 15 cm/menit, **gambar 3(b)** menunjukkan kecepatan pengelasan 20 cm/menit, dan **gambar 3(c)** menunjukkan kecepatan pengelasan 25 cm/menit.



Gambar 3. Distribusi Temperatur

Distribusi termal diperoleh dari analisis termal transien 144 detik dan waktu pengelasan dari setiap parameter penelitian ini. Distribusi termal pada kecepatan pengelasan 15 cm/menit memiliki temperatur tertinggi sebesar 363,13°C bahkan pada area terkecil. Sebaliknya, distribusi termal pada kecepatan pengelasan

25 cm/menit menghasilkan temperatur tertinggi sebesar $257,74^{\circ}\text{C}$, tetapi pada area distribusi yang besar. Untuk membandingkan distribusi termal pada setiap parameter pengelasan, ditunjukkan pada **gambar 4**.



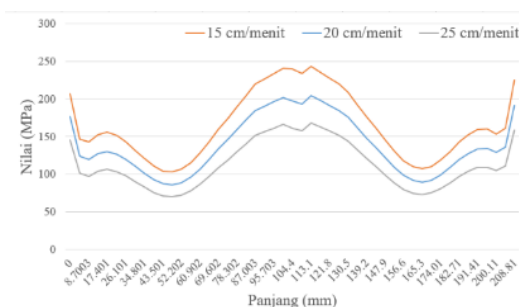
Gambar 4. Perbandingan Distribusi Temperatur

Pada **gambar 4** dapat dilihat bahwa temperatur tertinggi terjadi pada kecepatan pengelasan 15 cm/menit. Disebutkan pula bahwa kecepatan pengelasan terkecil pada proses pengelasan plat ASTM A36 akan mempengaruhi kenaikan temperatur setelah pengelasan [5]. Selain itu temperatur maksimum memiliki luasan terkecil dibandingkan dengan parameter lainnya, meskipun temperatur yang dihasilkan tinggi.

Analisa Struktural

Analisis struktur dilakukan dalam penelitian ini untuk mengetahui tegangan sisa dan distorsi setelah simulasi pengelasan. Simulasi pengelasan menggunakan parameter kecepatan pengelasan dan kondisi keterbatasan dalam analisis ini adalah tumpuan tetap yang terletak di pelat kiri dan kanan yang disesuaikan dengan arah pengelasan.

Pada proses pengelasan pelat ASTM A36 memiliki dua arah tegangan sisa yaitu *longitudinal* dan *transversal*. Tegangan sisa *longitudinal* berkembang searah dengan proses pengelasan yaitu pada sumbu z. Sementara itu, tegangan sisa *transversal* dapat dilihat tegak lurus dengan proses pengelasan pada sumbu x. Tegangan sisa *longitudinal* pada *transient structural* digambarkan pada **gambar 5**.

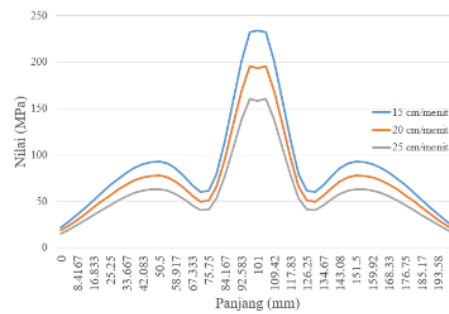


Gambar 5. Grafik tegangan sisa *longitudinal* pada berbagai parameter kecepatan pengelasan

Berdasarkan **gambar 5**, tegangan sisa *longitudinal* pada kecepatan pengelasan 15 cm/menit lebih besar dibandingkan dengan parameter kecepatan pengelasan lainnya yaitu 20 cm/menit dan 25 cm/menit dengan nilai tegangan sisa tertinggi sebesar 243,25 MPa. Sedangkan untuk kecepatan pengelasan 20 cm/menit dan 25 cm/menit memiliki nilai tegangan sisa sebesar 204,37 MPa dan 167,95 MPa.

Pada **gambar 6** menggambarkan tegangan sisa *transversal* pada setiap parameter kecepatan pengelasan. Dapat dilihat bahwa distribusi tegangan sisa *transversal* lebih rendah daripada tegangan sisa *longitudinal* pada kecepatan pengelasan 15 cm/menit dengan nilai 233,68 MPa. Selain itu, untuk kecepatan pengelasan 20 cm/menit dan 25 cm/menit memiliki nilai tegangan sisa *transversal* masing-masing 195,39 MPa

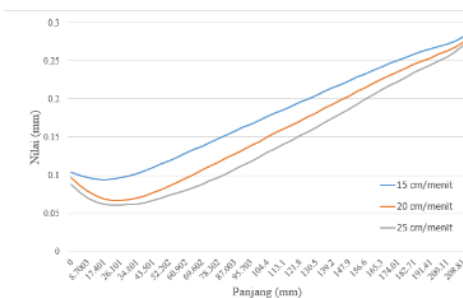
dan 160,29 MPa. Meskipun tegangan sisa *transversal* lebih kecil daripada tegangan sisa *longitudinal*, namun luas area tegangan sisa *transversal* sebenarnya lebih besar.



Gambar 6. Grafik Tegangan sisa *transversal* pada berbagai parameter kecepatan pengelasan

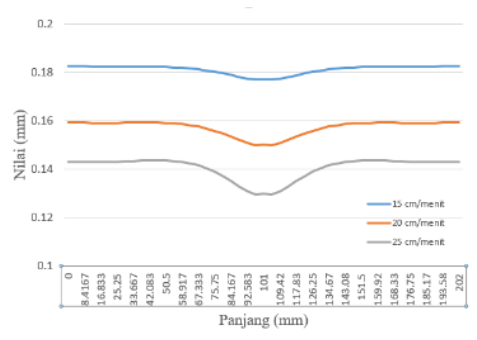
Tegangan sisa *longitudinal* mempunyai nilai terbesar pada daerah tengah pengelasan, demikian pula dengan tegangan sisa *transversal*. Hal ini dipengaruhi oleh tumpuan yang diletakkan pada sisi kanan dan kiri pelat ASTM A36, tegak lurus terhadap proses pengelasan pada sumbu x. Sementara itu, nilai tegangan sisa *transversal* lebih kecil dibandingkan dengan tegangan sisa *longitudinal* karena penyusutan setelah pengelasan akan lebih besar pada arah *longitudinal* yang dilalui oleh beban termal [6]. Pada arah pengelasan *transversal*, distorsi yang terjadi akan lebih besar akibat adanya hambatan dari *base metal*.

Pada **gambar 7** menunjukkan distorsi terbesar terjadi pada kecepatan pengelasan 15 cm/menit dengan arah *longitudinal* sebesar 0,28139 milimeter. Hal ini secara jelas menyatakan bahwa semakin rendah kecepatan pengelasan maka semakin baik distorsi yang terjadi pada proses pengelasan. Hasil distorsi diperoleh dari total simulasi selama 144 detik yang melibatkan pemanasan dan pendinginan pada proses pengelasan.



Gambar 7. Perbandingan distorsi *longitudinal* pada berbagai parameter kecepatan pengelasan

Distorsi terbesar terjadi pada titik awal dan titik akhir pengelasan, sedangkan distorsi terkecil terjadi pada daerah tengah. Perbandingan hasil distorsi pada arah *longitudinal* berbagai parameter kecepatan pengelasan juga dapat dilihat pada **gambar 7**. Distorsi *longitudinal* memiliki nilai tertinggi pada kecepatan pengelasan 15 cm/menit dengan nilai sebesar 0,28139 milimeter. Namun, nilai distorsi pada kecepatan pengelasan 20 cm/menit dan 25 cm/menit masing-masing sebesar 0,27476 milimeter dan 0,2709 milimeter. Distorsi terbesar terjadi pada titik akhir pengelasan. Distorsi *transversal* setelah pengelasan dapat dilihat pada **gambar 8**.

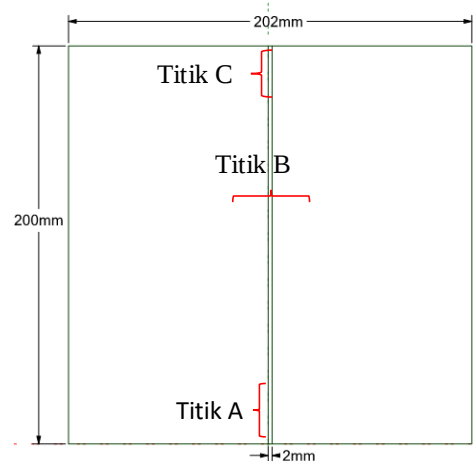


Gambar 8. Perbandingan distorsi *transversal* pada berbagai parameter kecepatan pengelasan

Pada simulasi pengelasan, distorsi *transversal* tertahan pada area terbesar karena adanya tumpuan tetap di sisi kiri dan kanan pelat ASTM A36 yang menjaga pelat pada posisinya. Perbandingan berbagai parameter kecepatan pengelasan terhadap distorsi *transversal* juga ditunjukkan pada **gambar 8**. Grafik menunjukkan bahwa kecepatan pengelasan yang lebih rendah akan mempengaruhi peningkatan distorsi *transversal*. Peningkatan ini terjadi karena distorsi *transversal* kecepatan pengelasan 15 cm/menit menunjukkan distorsi tertinggi sebesar 0,18266 milimeter. Selain itu, kecepatan pengelasan 20 cm/menit dan 25 cm/menit menunjukkan distorsi tertinggi sebesar 0,15941 milimeter dan 0,1436 milimeter. Distorsi terjadi pada arah *transversal* dan meningkat secara bertahap sebelum mencapai daerah pusat pengelasan. Distorsi terbesar terjadi pada arah *transversal* karena logam mempertahankan karakteristiknya dan bagian *boundary condition fixed support* tidak terpengaruh oleh zona yang terkena panas (HAZ) maka tidak akan terjadi deformasi[7-8].

Pengamatan Uji Eksperimen Pengelasan

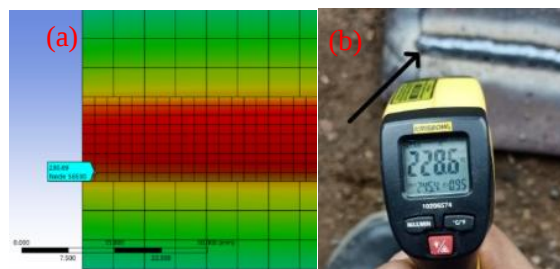
Pada penelitian ini, validasi secara eksperimental digunakan dengan tujuan untuk mengetahui distribusi temperatur pada spesimen yang terjadi di lapangan. Penelitian ini mengambil pengujian eksperimen hanya kecepatan pengelasan 25 cm/menit dikarenakan hasil tegangan sisa dan distorsi paling kecil. Pengambilan titik validasi dapat dilihat pada **gambar 9**.



Gambar 9. Titik Penilaian Validasi

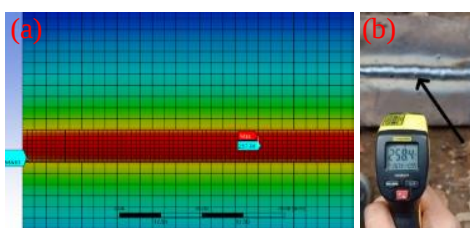
Proses scanning dilakukan menggunakan *infrared thermometer* yang diarahkan pada beberapa titik yaitu titik A pada *Heat Affected Zone (HAZ)*, titik B (*Base material* kanan dan kiri), dan titik C (*Area weldbead*). Tingkat akurasi yang dimiliki oleh *infrared thermometer* yaitu $\pm 2\%$ atau $\pm 2^\circ\text{C}$. **Gambar 10(a)**

merupakan hasil simulasi dan **gambar 10(b)** merupakan hasil pengujian lapangan hasil perbandingan dari kedua pengujian. Pengujian ini menghasilkan selisih persentase sebesar 0,90%.



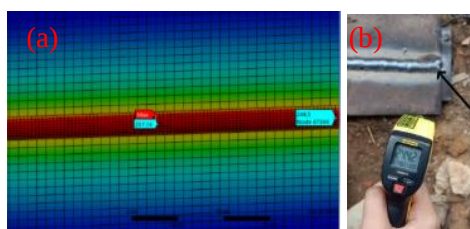
Gambar 10. Perbandingan Pengujian Material Titik A *Travel Speed* 25 cm/menit

Gambar 11(a) merupakan hasil simulasi dan **gambar 11(b)** merupakan hasil pengujian di titik B dengan nilai persentase sebesar 0,25%.



Gambar 11. Perbandingan Pengujian Material Titik B *Travel Speed* 25 cm/menit

Pada **gambar 12(a)** dan **gambar 12(b)** menunjukkan hasil perbandingan di titik C dengan nilai persentase 1,73%.

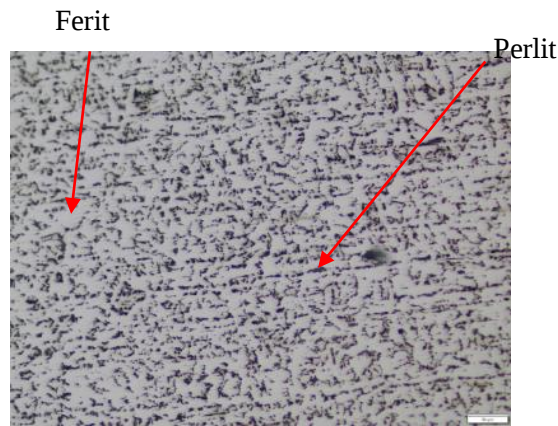


Gambar 12. Perbandingan Pengujian Material Titik C *Travel Speed* 25 cm/menit

Validasi Uji Pengamatan Mikrostruktur

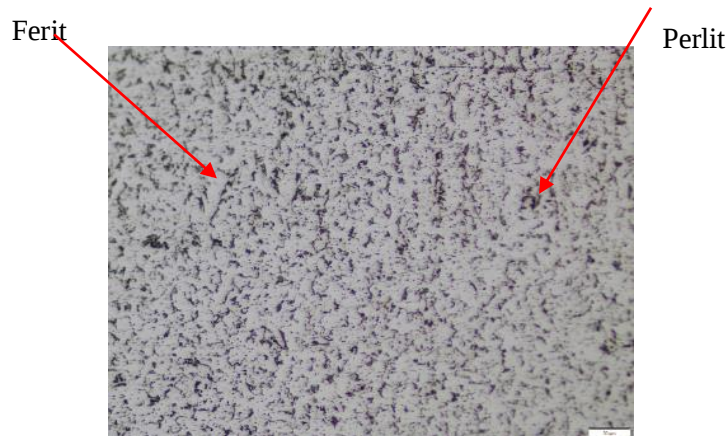
Validasi eksperimental melalui pengujian mikrostruktur pada spesimen pengelasan SMAW kecepatan 25 cm/menit pada simulasi FEM memvalidasi kesesuaian antara distribusi panas simulasi dan karakteristik mikrostruktur aktual. Observasi menunjukkan morfologi butir halus di *weld metal* dan HAZ, dengan pola pertumbuhan butir konsisten terhadap *heat input* rendah. Analisis komposisi *ferrite* (area terang) dan *pearlite* (area gelap berlapis) melalui teknik metalografi memperkuat validitas model numerik. Penelitian menunjukkan bahwa perbedaan warna ini berkaitan dengan komposisi dan sifat mekanik material[8].

Pengamatan mikrostruktur HAZ (200x) pada **gambar 13** dengan pengelasan SMAW 25 cm/menit menunjukkan mikrostruktur halus-seragam tanpa pertumbuhan butir berlebihan, mengindikasikan *heat input* rendah. Hal ini sejalan dengan teori peningkatan kecepatan pengelasan yang mempersempit HAZ dan meningkatkan laju pendinginan, sehingga menekan pertumbuhan butir. Temuan ini mendukung validasi simulasi FEM bahwa kecepatan 25 cm/menit menghasilkan tegangan sisa dan distorsi minimal.



Gambar 13. Struktur Mikro HAZ Perbesaran 200x

Gambar 14 merupakan hasil pengujian metalografi pada daerah pengelasan (*weld metal*). Hasil mikrostruktur menunjukkan bahwa butiran logam pada daerah las memiliki bentuk yang halus dan merata, tanpa pertumbuhan butir yang besar. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan pengelasan tinggi menghasilkan *heat input* yang rendah, sehingga proses pendinginan lebih cepat dan pertumbuhan butir dapat ditekan.



Gambar 14. Struktur Mikro Daerah Lasan Perbesaran 200x

KESIMPULAN

Pemodelan metode elemen hingga (FEM) menggunakan perangkat lunak ANSYS terhadap perilaku termal selama pengelasan busur logam pelindung (SMAW) pelat ASTM A36 berhasil disimulasikan. Distribusi termal tertinggi diamati sebesar 363,13°C pada kecepatan pengelasan 15 cm/menit meskipun pada area kecil. Tegangan sisa dan distorsi memiliki nilai tertinggi pada arah *transversal*. Hasil validasi eksperimen dan pengamatan mikrostruktur mendukung temuan simulasi, di mana kecepatan 25 cm/menit menghasilkan struktur mikro halus dan seragam tanpa pertumbuhan butir yang berlebihan. Dengan demikian, kecepatan pengelasan 25 cm/menit direkomendasikan sebagai parameter optimal untuk meminimalkan tegangan sisa dan distorsi, serta meningkatkan kualitas sambungan las pada pelat ASTM A36 menggunakan proses SMAW.

REFERENSI

- [1] J. Klassen, T. Nitschke-Pagel, dan K. Dilger, "Simplified residual stress and distortion calculations of multi-pass welds and their possible influence on result quality," *Weld. World*, vol. 63, no. 5, hal. 1291–1301, 2019, doi: 10.1007/s40194-019-00748-7.
- [2] R. Wu, Y. Huang, J. Xu, Y. Rong, dan Q. Chen, "Stress and distortion of the 10 mm thick plate EH40 and 316L

- different butt joints in 10 kW laser welding,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 152, no. November 2021, hal. 108179, 2022, doi: 10.1016/j.optlastec.2022.108179.
- [3] Sutrimo, I. Azmy, F. Koeshardono, dan R. Winarta, “Effect of Welding Speed on Residual Stress and Distortion of AISI 1045 Plate Using the Finite Element Method (FEM),” *Int. J. Adv. Sci. Res. Eng.*, vol. 09, no. 01, hal. 01–08, 2023, doi: 10.31695/ijasre.2023.9.1.1.
- [4] H. Wibowo, M. N. Ilman, dan P. Tri Iswanto, “Analisa Heat Input Pengelasan terhadap Distorsi, Struktur Mikro dan Kekuatan Mekanis Baja A36,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 7, no. 1, hal. 5–12, 2016, doi: 10.21776/ub.jrm.2016.007.01.2.
- [5] N. Yohanes dan A. M. Sianipar, “Experimental Effect of Angle Variation and Speed Welding Filler Using Vertical Adaptive Sliding System In SMAW Welding,” *JOMase | Receiv.*, vol. 59, no. 1, hal. 1–5, 2018, [Daring]. Tersedia pada: www.isomase.org.
- [6] M. H. A. Kadir, M. Asmelash, dan A. Azhari, “Investigation on welding distortion in stainless steel sheet using gas tungsten arc welding process,” *Mater. Today Proc.*, vol. 46, hal. 1674–1679, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.07.264.
- [7] L. Fengde *et al.*, “Study of the microstructure and impact properties of the heat-affected zone of high nitrogen steel for laser-arc hybrid welding,” *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 7, Apr 2019, doi: 10.1088/2053-1591/ab11f7.
- [8] J. Aldo dan H. Hariyono, “Pengaruh Temperatur Media Pendingin Terhadap Perubahan Struktur Mikro Baja Karbon Sedang,” *Sebatik*, vol. 26, no. 2, hal. 718–724, 2022, doi: 10.46984/sebatik.v26i2.2081.